

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

**DEPARTAMENTO DE FUNDAMENTOS DE ECONOMÍA E HISTORIA  
ECONÓMICA**



**TESIS DOCTORAL**

**VALORACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES PRODUCIDAS  
POR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: EL CASO DE  
CANDIOTA (BRASIL). PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS Y COSTES DE LA  
ENERGÍA**

**DOCTORANDO:**

**CARLOS ALMIRO DE MAGALHÃES MELO**

**DIRECTOR:**

**DR. D. DIEGO AZQUETA OYARZUN**

**CODIRECTOR:**

**DR. D. JOSEPH VITO SPADARO**

**ALCALÁ DE HENARES, JUNIO DE 2012**



El Doctor D. DIEGO AZQUETA OYARZUN, Catedrático de Universidad, adscrito al Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica de la Universidad de Alcalá,

**CERTIFICA:**

Que la tesis doctoral titulada "Valoración económica de las externalidades producidas por la generación de energía eléctrica: El caso de Candiota (Brasil). Perspectivas tecnológicas y costes de la energía", elaborada por D. Carlos Almiro de Magalhaes Melo, ha sido dirigida por mí y doy conformidad a su presentación para su depósito y para proceder a su lectura y defensa, de acuerdo con la normativa vigente.

Y para que así conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Alcalá de Henares, a veinticinco de mayo de dos mil doce.




Fdo. Dr. D. Diego Azqueta Oyarzun

El Doctor D. Joseph Vito Spadaro, *Research Professor*, adscrito al *Basque Centre for Climate Change, BC3*

**CERTIFICA:**

Que la tesis doctoral titulada "Valoración económica de las externalidades producidas por la generación de energía eléctrica: El caso de Candiota (Brasil). Perspectivas tecnológicas y costes de la energía", elaborada por D. Carlos Almiro de Magalhaes Melo, ha sido codirigida por mí y doy conformidad a su presentación para su depósito y para proceder a su lectura y defensa, de acuerdo con la normativa vigente.

Y para que así conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Bilbao, a veinticinco de mayo de dos mil doce.

 J. V. Spadaro 25-5-2012  
Fdo. Dr. D. Joseph V. Spadaro

La Doctora Dña. GLORIA MORENO RAYMUNDO, Directora del Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica de la Universidad de Alcalá,

**CERTIFICA:**

Que la tesis doctoral titulada "Valoración económica de las externalidades producidas por la generación de energía eléctrica: El caso de Candiota (Brasil). Perspectivas tecnológicas y costes de la energía", elaborada por D. Carlos Almiro de Magalhaes Melo, reúne los requisitos exigidos de acuerdo con la normativa vigente.

**POR LO QUE:**

Autoriza la presentación de la citada tesis doctoral, para proceder a su lectura y defensa ante el tribunal correspondiente.

Y para que así conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Alcalá de Henares, a veinticinco de mayo de dos mil doce.



Fdo. Dra. Dña. Gloria Moreno Raymundo

*A mis padres Carlos Almiro y Ana Rubra, un ejemplo de vida.*

*Especial mención a mi abuela Noemi, con sus 93 años, una fuente  
de inspiración.*

*A mis queridas hermanas, Flávia e Ana Carla.*

*“Amo muito todos vocês”*

# AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincera gratitud hacia aquellas personas e instituciones que, de forma directa e indirecta, hicieron posible emprender este viaje. Ofrezco mis humildes disculpas ante cualquier olvido involuntario y, en cualquier caso, imperdonable.

No podría dejar de empezar sin agradecer al Dr. Diego Azqueta y Joseph V. Spadaro, por sus sabias instrucciones, paciencia y sobre todo por sus amistades a lo largo de esta investigación. Sin sus amplios conocimientos científicos y apoyo esta tesis no hubiese sido posible. Sin lugar a duda una fuente de inspiración y un ejemplo a seguir. Con toda seguridad extrañaré sus instrucciones.

A Mario Martos, compañero de la UAH, por su apoyo, cariño e sobre todo por su amistad. A Juan Carlos González, Director de la Cátedra de RSC de la UAH, primero por su amistad y cariño, pero también por el valioso soporte institucional. Sin ellos, todo hubiese resultado más difícil. También quisiera agradecer a mis amigos y compañeros de Universidad: Ana Ramírez, Luis Zelaya, Marcos, Esteban y Diana. A Carol y Mavi, queridas amigas, por su amistad y valiosos aportes técnicos.

A la CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica), IBAMA (Instituto Brasileiro de Meioambiente) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) por las distintas informaciones que han enriquecido esta investigación.

A Arnulfo Sánchez y Guido Zack, por su gran amistad y compañía mutua durante el desarrollo de nuestras respectivas tesis. A Fran, mi gran amigo. A todos mis amigos cuyas valiosas amistades multiculturales han hecho con que este período en España haya sido inolvidable.

Quisiera compartir este momento con mi familia y amigos en Brasil que siempre estuvieron a mi lado durante este periodo de ausencia. A mis padres, Carlos y Ana, a mi abuela Noemi y a mis hermanas Fau e Ninha. A mi querida madrina “Dinda Mini” y a mi tía Nata y mi padrino Luis. A mis tías Vita, Leika, Stela y Nerina. A mi tío Marc y Walter. A mis cuñados Derica y Danilo. A mis primas Juju, Vínia, Lai y demás primos(as).

No podría dejar de mencionar la valiosa contribución de:

**Universidad de Alcalá**

Myriam Valdezate y Leandro, Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica

Ana Guerrero, Departamento de Ecología.

Milagros Berlanga, Departamento de Fundamentos del Derecho y Derecho Penal.

Trini, Basílio, José María y demás amigos de la Facultad de Derecho.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD .....	3
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	9
1.3. OBJETIVO GENERAL .....	10
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.5. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN .....	14
<b>CAPÍTULO 2 : LA ENERGÍA EN BRASIL Y EL CASO DE ESTUDIO DE CANDIOTA .....</b>	<b>16</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	17
2.2. LA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEÑA: VISIÓN GENERAL EN 2010 .....	17
2.2.1. <i>Energía eléctrica</i> .....	19
2.2.2. <i>Petróleo y derivados</i> .....	21
2.2.3. <i>Gas natural</i> .....	22
2.2.4. <i>Derivados de la caña de azúcar</i> .....	23
2.2.5. <i>Leña y carbón vegetal</i> .....	24
2.2.6. <i>Carbón</i> .....	24
2.2.6.1. Carbón: estado a nivel mundial.....	25
2.2.6.2. El carbón en Brasil.....	27
2.3. EL CASO DE ESTUDIO: LA REGIÓN DE CANDIOTA Y LA MINERÍA DEL CARBÓN.....	28
2.3.1. <i>La región de Candiota y la generación termoeléctrica a partir del carbón</i> .....	28
2.3.2. <i>Los impactos al medioambiente y a la salud humana</i> .....	31
<b>CAPÍTULO 3 : VALORACIÓN DE LAS EXTERNALIDADES DE LA ENERGÍA: ANTECEDENTES .....</b>	<b>35</b>
3.1. CONCEPTUALIZACIÓN INICIAL.....	36
3.2. EL MERCADO, BIENES PÚBLICOS Y EXTERNALIDADES.....	37
3.3. LAS EXTERNALIDADES DE LA ENERGÍA .....	41
3.4. ESTADO DE LA CUESTIÓN: ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA VALORACIÓN ECONÓMICA DE EXTERNALIDADES DE LA ENERGÍA.....	46
3.4.1. <i>Hohmeyer (1988)</i> .....	53
3.4.2. <i>Ottinger et ál. (1991) Pace University Study</i> .....	53
3.4.3. <i>Pearce et ál. (1992, 1995)</i> .....	54
3.4.4. <i>Friedrich &amp; Voss (1993)</i> .....	54
3.4.5. <i>Ball et ál. (1994)</i> .....	55
3.4.6. <i>Ontario Hydro (1993)</i> .....	55
3.4.7. <i>ORNL/RFF (1994, 1994a)</i> .....	55
3.4.8. <i>Rowe (1995) o The New York Externality Study</i> .....	56
3.4.9. <i>El proyecto ExternE (European Comission, 2005)</i> .....	57
3.4.10. <i>Proyecto CAFE (AEAT, 2005, 2005a)</i> .....	61
3.4.11. <i>Proyecto NEEDS (NEEDS, 2009)</i> .....	64
<b>CAPÍTULO 4 : EL UNIFORM WORLD MODEL (MARCO METODOLÓGICO) .....</b>	<b>66</b>
4.1. INTRODUCCIÓN.....	67
4.2. INSTRUMENTALIZACIÓN DEL UWM: ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	69
4.2.1. <i>Premisa inicial</i> .....	69
4.2.2. <i>Metodología del UWM</i> .....	69
4.2.2.1. El Simplified Uniform World Model (SUWM) .....	69
4.2.2.2. El Robust Uniform World Model (RUWM) .....	80

4.2.3.	<i>Validación del SUWM</i> .....	81
4.2.3.1.	SUWM vs. NEEDS .....	81
4.2.3.2.	UWM vs. CAFE.....	82
4.2.3.3.	UWM vs EC4MACS .....	83
4.3.	TRATAMIENTO DE LOS DATOS ( <i>INPUT</i> ) REQUERIDOS POR EL UWM .....	84
4.3.1.	<i>Parámetros de la fuente, emisiones y Depletion Velocity</i> .....	86
4.3.1.1.	Parámetros de la fuente.....	86
4.3.1.2.	Emisiones .....	89
4.3.1.3.	Depletion Velocity (DV).....	90
4.3.2.	<i>Distribución de la población</i> .....	91
4.3.3.	<i>Funciones concentración – respuesta (CRF)</i> .....	93
4.3.3.1.	Mortalidad infantil (IF) .....	96
4.3.3.2.	Mortalidad crónica (CM) .....	98
4.3.3.3.	Mortalidad aguda (MA).....	104
4.3.3.4.	Bronquitis crónica (CB).....	104
4.3.3.5.	Días de trabajo perdidos (WDL) .....	105
4.3.3.6.	Días de actividad restringida (RAD), días de actividad restringida menor (mRAD) y días de actividad restringida neta (netRAD).....	106
4.3.3.7.	Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) .....	109
4.3.3.8.	Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA) .....	110
4.3.3.9.	Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa), adultos asmáticos .....	111
4.3.3.10.	Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos .....	112
4.3.3.11.	Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos.....	113
4.3.3.12.	Uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos.....	114
4.3.4.	<i>Valoración económica – costes unitarios</i> .....	114
4.3.4.1.	Mortalidad infantil (IF) .....	119
4.3.4.2.	Mortalidad crónica (CM) y mortalidad aguda (MA) .....	120
4.3.4.3.	Bronquitis crónica (CB): Nuevos casos .....	121
4.3.4.4.	Días de trabajo perdidos (WDL) .....	122
4.3.4.5.	Días de actividad restringida (RAD), días de actividad restringida menor (mRAD) y días de actividad restringida neta (netRAD).....	123
4.3.4.6.	Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) e ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA) .....	124
4.3.4.7.	Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa) – Adultos- y síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos .....	124
4.3.4.8.	Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos y uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos .....	125
4.3.5.	<i>Datos meteorológicos</i> .....	127
4.3.5.1.	Categorías de estabilidad de Pasquill .....	128
4.3.5.2.	Altura de la capa de mezcla ( $h_{mix}$ ) .....	130
4.3.5.3.	Interpretación de los datos meteorológicos .....	134
4.3.5.4.	Concentraciones a escala local.....	138
<b>CAPÍTULO 5 : RESULTADOS .....</b>		<b>142</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	143
<b>PARTE I: RESULTADOS .....</b>		<b>145</b>
5.2.	IMPACTOS SOBRE LA SALUD HUMANA.....	145
5.2.1.	<i>Costes externos según la zona de impacto: local y regional</i> .....	147
5.2.2.	<i>Costes externos por contaminante</i> .....	150
5.2.3.	<i>Costes externos según aspecto de salud</i> .....	152
5.2.3.1.	Mortalidad.....	153
5.2.3.2.	Morbilidad .....	153
5.3.	CAMBIO CLIMÁTICO: EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	156

5.4.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS .....	157
<b>PARTE II: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE Y SENSIBILIDAD .....</b>		<b>159</b>
5.5.	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE .....	159
5.5.1.	<i>Modelos de dispersión atmosférica: cálculo de la exposición</i> .....	163
5.5.2.	<i>Funciones concentración-respuesta (CRF)</i> .....	164
5.5.3.	<i>Costes unitarios (UC)</i> .....	165
5.5.4.	<i>Combinación de las incertidumbres</i> .....	168
5.6.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	170
5.6.1.	<i>Datos meteorológicos y ubicación de la central (siting)</i> .....	170
5.6.2.	<i>Funciones concentración-respuesta: Número de muertes prematuras vs. YOLL</i> .....	174
5.6.3.	<i>Variabilidad relacionada con la exposición: Depletion Velocity (DV)</i> .....	176
5.6.4.	<i>Variabilidad relacionada con la toxicidad de los contaminantes</i> .....	178
5.6.4.1.	Distintos escenarios de toxicidad de los contaminantes secundarios.....	178
5.6.4.2.	Toxicidad de las partículas .....	181
5.6.5.	<i>Costes unitarios (UC)</i> .....	184
5.6.5.1.	PIB per cápita vs. PPPGDP per cápita .....	184
5.6.5.2.	Sensibilidad a partir de distintas elasticidades renta de la DAP .....	185
5.6.6.	<i>Apuntes finales</i> .....	187
<b>CAPÍTULO 6 : ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y ECONOMÍA DE LA ZONA.....</b>		<b>191</b>
6.1.	PREMISA INICIAL .....	192
6.2.	LA IMPORTANCIA DE LA MINERÍA DEL CARBÓN PARA LA ECONOMÍA DEL MUNICIPIO DE CANDIOTA .....	194
6.2.1.	<i>Los efectos multiplicadores sobre la estructura productiva</i> .....	197
6.3.	LAS TECNOLOGÍAS LIMPIAS DEL CARBÓN (CCT) .....	201
6.3.1.	<i>Tecnologías relacionadas con la reducción y control de los contaminantes</i> .....	203
6.3.1.1.	El Coal Cleaning .....	204
6.3.1.2.	Sistemas Flue Gas Desulphurisation (FGD), Selective Catalytic Reduction (SCR) y Selective Noncatalytic Reduction (SNCR) .....	205
6.3.1.3.	Filtros de Aire Electroestático (ESP) .....	206
6.3.2.	<i>Tecnologías que supondrían cambios estructurales en los ciclos de combustión</i> .....	206
6.3.2.1.	Ultra-supercritical power plants (USC).....	206
6.3.2.2.	Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (IGCC) y la Externally Fired Combined Cycle (EFCC).....	207
6.3.2.3.	Combustión en Lecho Fluidizado (Fluidised Bed Combustion) – FBC.....	208
6.4.	SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS .....	209
6.4.1.	<i>Alternativa A: Introducción de sistemas de combustión a lecho fluidizado (FBC)</i> .....	214
6.4.2.	<i>Alternativa B: Introducción de sistemas de control de emisiones de partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>: ESP, FGD y SCR</i> .....	219
6.4.3.	<i>Alternativa C: Adaptación (repowering) a IGCC</i> .....	221
6.4.4.	<i>Alternativa D: Conversión a gas natural (repowering)</i> .....	224
6.5.	COSTES DE CAPITAL DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y BENEFICIOS SOCIALES QUE APORTARÍAN.....	227
6.5.1.	<i>Escenario 1: toxicidad equivalente para todos los contaminantes (PPM y SPM) y cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>)</i> .....	230
6.5.2.	<i>Escenario 2: únicamente efectos de las partículas (PPM)</i> .....	235
6.5.3.	<i>Escenario 3: toxicidad de las partículas (PPM) y sulfatos, sin efectos de los nitratos</i> .....	237
6.5.4.	<i>Escenario 4: coste externo total sin incluir la mortalidad crónica</i> .....	239
<b>CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES.....</b>		<b>241</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>251</b>

<b>ANEXO 1:</b> <i>CRF UTILIZADAS EN EL CASO DE ESTUDIO</i> .....	264
<b>ANEXO 2:</b> <i>COSTES UNITARIOS (UC) PARA EL CASO DE ESTUDIO</i> .....	267
<b>ANEXO 3:</b> <i>ESCALA DE CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN</i> .....	270
<b>ANEXO 4:</b> <i>LONGITUD DE RUGOSIDAD</i> .....	271
<b>ANEXO 5:</b> <i>DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE LOS VIENTOS SEGÚN SU DIRECCIÓN Y VELOCIDAD (CASO DE ESTUDIO)</i> .....	272
<b>ANEXO 6:</b> <i>CRF PARA MORTALIDAD CRÓNICA (ARGENTINA)</i> .....	273
<b>ANEXO 7:</b> <i>CRF PARA MORTALIDAD CRÓNICA (URUGUAY)</i> .....	274
<b>ANEXO 8:</b> <i>CRF PARA MORTALIDAD CRÓNICA (PARAGUAY)</i> .....	275
<b>ANEXO 9:</b> <i>EXTERNALIDADES DE LA ENERGÍA ESTIMADAS EN DIVERSOS ESTUDIOS</i> .....	276
<b>ANEXO 10:</b> <i>RESULTADOS EXTERNE</i> .....	277
<b>ANEXO 11:</b> <i>ESTIMACIÓN DEL COSTE EXTERNO SEGÚN DISTINTAS ELASTICIDADES RENTA DE LA DAP</i> .....	279

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1</b>	CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN DE CANDIOTA .....	29
<b>TABLA 2.2</b>	PRINCIPALES PROBLEMAS DE SALUD DE LOS HABITANTES DE CANDIOTA (% ENTREVISTADOS) .....	34
<b>TABLA 3.1</b>	PRINCIPALES IMPACTOS CUANTIFICADOS DURANTE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA, SEGÚN EL TIPO DE FUENTE .....	42
<b>TABLA 3.2</b>	CONTAMINANTES Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD .....	45
<b>TABLA 3.3</b>	RELACIÓN DE LOS ESTUDIOS/MODELOS SOBRE LAS EXTERNALIDADES DE LA ENERGÍA .....	47
<b>TABLA 3.4</b>	CRF UTILIZADAS EN EL PROYECTO EXTERNE .....	60
<b>TABLA 3.5</b>	IMPACTOS Y CONTAMINANTES VALORADOS EN EL CAFE .....	62
<b>TABLA 3.6</b>	RESULTADOS DEL PROYECTO CAFE, EN EL CASO DE QUE SE APLICARA LA ACTUAL LEGISLACIÓN EUROPEA (MIL MILLONES DE EUROS): 2000- 2020 .....	63
<b>TABLA 3.7</b>	COSTES EXTERNOS POR TONELADA DE CONTAMINANTE (PRECIOS DEL AÑO 2000) UNIÓN EUROPEA 27 PAÍSES (UE-27) .....	65
<b>TABLA 4.1</b>	VALORES RECOMENDADOS PARA LOS PARÁMETROS $S_{SH}$ Y $S_{CT}$ .....	79
<b>TABLA 4.2</b>	DETALLES TÉCNICOS DE LA CENTRAL (DATOS MÁS RECIENTES DISPONIBLES) .....	87
<b>TABLA 4.3</b>	EMISIONES (T/AÑO), ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA (GWH), POTENCIA INSTALADA (MW) Y FACTOR DE CAPACIDAD (%). .....	90
<b>TABLA 4.4</b>	<i>DEPLETION VELOCITY</i> POR CONTAMINANTES Y PAÍS .....	91
<b>TABLA 4.5</b>	ÁREA, POBLACIÓN Y DENSIDAD A ESCALA REGIONAL .....	92
<b>TABLA 4.6</b>	MORTALIDAD INFANTIL - CAUSAS RESPIRATORIAS- (CASO DE ESTUDIO) .....	97
<b>TABLA 4.7</b>	DATOS CRF MORTALIDAD CRÓNICA (ADULTOS > 30 AÑOS) .....	101
<b>TABLA 4.8</b>	CRF PARA MORTALIDAD CRÓNICA (BRASIL) .....	102
<b>TABLA 4.9</b>	DATOS CRF BRONQUITIS CRÓNICA (ADULTOS > 27 AÑOS) .....	105
<b>TABLA 4.10</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF – <i>WDL</i> - (POBLACIÓN ENTRE 15 Y 64 AÑOS) .....	106
<b>TABLA 4.11</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - RAD (POBLACIÓN ENTRE 15 Y 64 AÑOS) .....	107
<b>TABLA 4.12</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF <i>MRAD</i> (POBLACIÓN ENTRE 18 Y 64 AÑOS) .....	108
<b>TABLA 4.13</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - RHA (TODA LA POBLACIÓN) .....	110
<b>TABLA 4.14</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - CHA (TODA LA POBLACIÓN) .....	111
<b>TABLA 4.15</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - LRSA (ADULTOS > 15 AÑOS) .....	112
<b>TABLA 4.16</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - BDU (ADULTOS > 15 AÑOS) .....	112
<b>TABLA 4.17</b>	PREVALENCIAS DE ASMA, CASO DE ESTUDIO (%) .....	113
<b>TABLA 4.18</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - LRSC (NIÑOS ENTRE 5-14 AÑOS) .....	113
<b>TABLA 4.19</b>	DATOS Y PENDIENTE CRF - BDUC (NIÑOS ENTRE 5-14 AÑOS) .....	114
<b>TABLA 4.20</b>	FACTOR DE AJUSTE CASO DE ESTUDIO (2009) .....	118
<b>TABLA 4.21</b>	UC - IF (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	120
<b>TABLA 4.22</b>	UC - CM Y MA (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	121
<b>TABLA 4.23</b>	UC - CB (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	122
<b>TABLA 4.24</b>	UC – WDL (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	123
<b>TABLA 4.25</b>	UC- RAD, <i>NETRAD</i> Y <i>MRAD</i> (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	123
<b>TABLA 4.26</b>	UC - RHA Y CHA (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	124
<b>TABLA 4.27</b>	UC LRSA Y LRSC (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	125
<b>TABLA 4.28</b>	UC - BDU y BDUC (CASO DE ESTUDIO) 2009 .....	126
<b>TABLA 4.29</b>	RESUMEN DE LAS $S_{CRF}$ Y COSTES UNITARIOS (UC) CALCULADOS PARA EL CASO DE ESTUDIO. ....	126
<b>TABLA 4.30</b>	CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD DE PASQUILL .....	127
<b>TABLA 4.31</b>	MATRIZ PARA ESTIMAR LAS CATEGORÍAS DE PASQUILL .....	130
<b>TABLA 4.32</b>	MÉTODO PARA ESTIMAR LA ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA ( $H_{MIX}$ ) .....	131

<b>TABLA 4.33</b> VALORES MEDIOS PARA EL CSIRO .....	134
<b>TABLA 4.34</b> EJEMPLO DE DATOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS EN EL CASO DE ESTUDIO. ....	135
<b>TABLA 4.35</b> DISTRIBUCIÓN (%) DE LAS CATEGORÍAS DE PASQUILL.....	137
<b>TABLA 5.1</b> RESUMEN DE LOS DATOS REQUERIDOS POR UWM PARA EJECUTAR EL ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO DE CANDIOTA.....	144
<b>TABLA 5.2</b> RESULTADOS GLOBALES DEL CASO DE ESTUDIO .....	146
<b>TABLA 5.3</b> DISTRIBUCIÓN (%) DEL COSTE EXTERNO SEGÚN LA ZONA DE IMPACTO (LOCAL/REGIONAL) .....	150
<b>TABLA 5.4</b> RESULTADO GLOBAL Y COSTE POR KG DE CONTAMINANTE (US\$ 2009) .....	151
<b>TABLA 5.5</b> COSTE EXTERNO (US\$) – MORTALIDAD POR CONTAMINANTE.....	153
<b>TABLA 5.6</b> COSTE EXTERNO (US\$) – MORBILIDAD POR CONTAMINANTE.....	156
<b>TABLA 5.7</b> EMISIONES DE CO <sub>2</sub> Y SU VALORACIÓN ECONÓMICA. ....	157
<b>TABLA 5.8</b> ALGUNOS ESTUDIOS PRECURSORES DE VSL ESTIMADOS ENTRE DIVERSOS PAÍSES .....	166
<b>TABLA 5.9</b> RESUMEN DE LAS $\sigma_e$ SEGÚN FUENTE DE INCERTIDUMBRE.....	167
<b>TABLA 5.10</b> ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DEL COSTE DEL DAÑO POR CONTAMINANTE (CASO DE ESTUDIO) .....	169
<b>TABLA 5.11</b> COSTES EXTERNOS SUWM VS. RUWM (MILLONES DE US\$;2009) .....	173
<b>TABLA 5.12</b> ESTIMATIVA DE LOS COSTES EXTERNOS POR MORTALIDAD CRÓNICA: Nº DE MUERTES VS. YOLL .....	175
<b>TABLA 5.13</b> LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LAS DV .....	176
<b>TABLA 5.14</b> COSTES EXTERNOS SEGÚN DISTINTAS DV .....	177
<b>TABLA 5.15</b> FACTORES DE CORRECCIÓN, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CASO DE ESTUDIO.....	179
<b>TABLA 5.16</b> ESTIMACIÓN DE LOS COSTES EXTERNOS TENIENDO EN CUENTA LAS PM <sub>2,5</sub> Y PM <sub>10-2,5</sub> .....	182
<b>TABLA 5.17</b> CRF PARA LAS PARTÍCULAS FINAS Y COARSE .....	183
<b>TABLA 5.18</b> ESTIMATIVA DE LOS COSTES EXTERNOS SEGÚN EL PPPGDP PER CÁPITA O PIB PER CÁPITA. ....	186
<b>TABLA 5.19</b> CUADRO RESUMEN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	189
<b>TABLA 6.1</b> DATOS ECONÓMICOS DE LOS MUNICIPIOS PERTENECIENTES A LA REGIÓN DE CANDIOTA (2009).....	195
<b>TABLA 6.2</b> ESTRUCTURA DEL EMPLEO EN CANDIOTA (% DE PERSONAS).....	197
<b>TABLA 6.3</b> INFORMACIONES UTILIZADAS EN EL MULTIPLICADOR KEYNESIANO LOCAL.....	199
<b>TABLA 6.4</b> RESULTADOS MULTIPLICADOR KEYNESIANO LOCAL. CANDIOTA .....	200
<b>TABLA 6.5</b> COSTES DE ADAPTACIÓN DE LA CENTRAL DE CANDIOTA – CCT Y GAS NATURAL .....	211
<b>TABLA 6.6</b> CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS CCT: EMISIONES EVITADAS .....	213
<b>TABLA 6.7</b> EJEMPLOS DE CENTRALES QUE APLICARON CCT Y LOS NIVELES DE EFICIENCIA LOGRADOS. ....	214
<b>TABLA 6.8</b> COSTE TOTAL DE LA INVERSIÓN (FBC) - 2009.....	216
<b>TABLA 6.9</b> EJEMPLO DE CÁLCULO DE LOS BENEFICIOS SOCIALES (PM <sub>10</sub> ) .....	218
<b>TABLA 6.10</b> BENEFICIO SOCIAL SEGÚN LA TECNOLOGÍA EMPLEADA - FBC .....	219
<b>TABLA 6.11</b> COSTES DE CAPITAL Y EFICIENCIA AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS ESP, FGD Y SCR .....	220
<b>TABLA 6.12</b> COSTE TOTAL DE LA INVERSIÓN SISTEMA PCC-ESP + FGD + SCR .....	220
<b>TABLA 6.13</b> BENEFICIO SOCIAL SEGÚN LA TECNOLOGÍA EMPLEADA – PCC-ESP+FGD+SCR .....	221
<b>TABLA 6.14</b> COSTES TOTALES PARA LA ADAPTACIÓN DE LA CENTRAL DE CANDIOTA A IGCC.....	222
<b>TABLA 6.15</b> BENEFICIO SOCIAL SEGÚN LA TECNOLOGÍA EMPLEADA - IGCC .....	223
<b>TABLA 6.16</b> COSTES DE CAPITAL ADAPTACIÓN DE LA CENTRAL DE CANDIOTA A GAS NATURAL (CICLO COMBINADO).....	225
<b>TABLA 6.17</b> BENEFICIO SOCIAL SEGÚN LA TECNOLOGÍA EMPLEADA – GAS NATURAL (GN).....	226

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 2.1</b> EVOLUCIÓN DE LA OFERTA INTERNA DE ENERGÍA ( $10^3$ TEP) SEGÚN TIPO DE FUENTE. BRASIL .....	18
<b>GRÁFICO 2.2</b> COMPOSICIÓN DE LA OFERTA INTERNA DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTE (%). BRASIL (2010) .....	19
<b>GRÁFICO 2.3</b> PRODUCCIÓN DE DERIVADOS DEL PETRÓLEO Y GAS NATURAL (% PRODUCCIÓN TOTAL) 2010.....	21
<b>GRÁFICO 2.4</b> DISTRIBUCIÓN (%) DEL CONSUMO FINAL DE GAS NATURAL POR SECTORES.....	23
<b>GRÁFICO 2.5</b> SUMINISTRO TOTAL DE ENERGÍA PRIMARIA (%) - MUNDO 2008 .....	26
<b>GRÁFICO 2.6</b> MIX DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR COMBUSTIBLE (%) - MUNDO 2008 .....	27
<b>GRÁFICO 3.1</b> COSTES EXTERNOS: RESULTADOS DE ALGUNOS ESTUDIOS, SEGÚN FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (CÉNTIMOS DE US\$; PRECIOS DE 1995; POR KWH) .....	52
<b>GRÁFICO 3.2</b> RESULTADOS DEL EXTERNE: COSTE EXTERNO (MUS\$/KWH), SEGÚN LA FUENTE DE ENERGÍA .....	61
<b>GRÁFICO 4.1</b> CARACTERÍSTICAS DE LAS CRF (EN CONTEXTO DE CONCENTRACIONES DE BAJAS).....	73
<b>GRÁFICO 4.2</b> COMPARACIÓN UWM VS NEEDS .....	82
<b>GRÁFICO 4.3</b> COMPARACIÓN UWM VS EC4MACS.....	84
<b>GRÁFICO 4.4</b> EVOLUCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA CRF PARA MORTALIDAD CRÓNICA (YOLL Y Nº DE MUERTES) .....	103
<b>GRÁFICO 4.5</b> ROSA DE LOS VIENTOS .....	136
<b>GRÁFICO 4.6</b> DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA (%) DE LOS VIENTOS (M/S) PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	137
<b>GRÁFICO 4.7</b> CONCENTRACIONES A ESCALA LOCAL ( $PM_{10}$ ). CANDIOTA (5x5 KM; RESOLUCIÓN).....	139
<b>GRÁFICO 4.8</b> CONCENTRACIONES A ESCALA LOCAL ( $NO_x$ ). CANDIOTA (5x5 KM; RESOLUCIÓN) .....	140
<b>GRÁFICO 4.9</b> CONCENTRACIONES A ESCALA LOCAL ( $SO_2$ ). CANDIOTA (5x5 KM; RESOLUCIÓN) .....	141
<b>GRÁFICO 5.1</b> COSTE EXTERNO MARGINAL POR KG DE CONTAMINANTE EMITIDO (US\$, 2009) .....	147
<b>GRÁFICO 5.2</b> COSTE EXTERNO MARGINAL POR KWH SEGÚN CONTAMINANTE (CÉNTIMOS DE US\$, 2009) .....	147
<b>GRÁFICO 5.3</b> PARTICIPACIÓN (%) DE CADA CONTAMINANTE SOBRE EL COSTE EXTERNO A ESCALA REGIONAL.....	148
<b>GRÁFICO 5.4</b> PARTICIPACIÓN (%) DE CADA CONTAMINANTE SOBRE EL COSTE EXTERNO A ESCALA LOCAL .....	149
<b>GRÁFICO 5.5</b> DISTRIBUCIÓN DEL COSTE EXTERNO POR CONTAMINANTE (% SOBRE COSTE EXTERNO TOTAL) .....	151
<b>GRÁFICO 5.6</b> DISTRIBUCIÓN DEL COSTE EXTERNO TOTAL (%) SEGÚN ASPECTO DE SALUD.....	152
<b>GRÁFICO 5.7</b> DISTRIBUCIÓN DEL COSTE EXTERNO POR MORBILIDAD (% SOBRE EL COSTE EXTERNO POR MORBILIDAD) .....	155
<b>GRÁFICO 5.8</b> PRECIO DE LA ENERGÍA DE DISTINTAS FUENTES VS COSTE EXTERNO CANDIOTA (2009). (US\$/MWH) .....	158
<b>GRÁFICO 5.9</b> INCERTIDUMBRE DE LOS COSTES EXTERNOS – INTERVALO DE CONFIANZA DEL 68% .....	169
<b>GRÁFICO 5.10</b> DISTRIBUCIONES LOGNORMALES POR CONTAMINANTE Y SUMATORIO DE ESTAS DISTRIBUCIONES .....	170
<b>GRÁFICO 5.11</b> VARIABILIDAD DEL COSTE EXTERNO SEGÚN DISTINTAS DV .....	177
<b>GRÁFICO 5.12</b> COMPOSICIÓN DEL COSTE EXTERNO TOTAL SEGÚN LA TOXICIDAD DE LOS CONTAMINANTES.....	180
<b>GRÁFICO 5.13</b> COSTE EXTERNO SEGÚN DIFERENTES ELASTICIDADES DE LA DAP .....	185

<b>GRÁFICO 6.1</b> PIB PER CÁPITA (2009), COMPARATIVA CON MUNICIPIOS VECINOS A CANDIOTA (R\$; REALES BRASILEÑOS) .....	195
<b>GRÁFICO 6.2</b> COMPARATIVA ENTRE EL VALOR AÑADIDO POR LAS DISTINTAS ACTIVIDADES: MUNICIPIOS VECINOS A CANDIOTA (2009) .....	196
<b>GRÁFICO 6.3</b> COSTES EXTERNOS SEGÚN DIFERENTES TASAS DE DESCUENTO .....	229
<b>GRÁFICO 6.4</b> BENEFICIOS SOCIALES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS: ESCENARIO 1 (100% PPM Y SPM + CO <sub>2</sub> ) .....	233
<b>GRÁFICO 6.5</b> BENEFICIOS SOCIALES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS: ESCENARIO. SENSIBILIDAD - TASA DE DESCUENTO 5%. .....	234
<b>GRÁFICO 6.6</b> BENEFICIOS SOCIALES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS: ESCENARIO 2 (100% PPM; SIN CAMBIO CLIMÁTICO) .....	236
<b>GRÁFICO 6.7</b> BENEFICIOS SOCIALES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS: ESCENARIO 3 (100% PPM; 100% SULFATOS; 0% NITRATOS; SIN CAMBIO CLIMÁTICO) .....	238
<b>GRÁFICO 6.8</b> BENEFICIOS SOCIALES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS: ESCENARIO 4 (100% PPM; 100%SPM; SIN MORTALIDAD CRÓNICA Y CAMBIO CLIMÁTICO) .....	240



## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE CANDIOTA .....	30
<b>FIGURA 2.2</b>	LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA PRESIDENTE MÉDICI - "CANDIOTA"- .....	31
<b>FIGURA 3.1</b>	METODOLOGÍA DE LAS VÍAS DE IMPACTO.....	58
<b>FIGURA 4.1</b>	ESBOZO DE LA PLUMA GAUSSIANA SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO .....	71
<b>FIGURA 4.2</b>	VISUALIZACIÓN GRÁFICA DEL TAMAÑO DE LAS PM.....	78
<b>FIGURA 4.3</b>	DATOS REQUERIDOS POR UWM.....	86
<b>FIGURA 4.4</b>	DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN LOCAL (5x5 KM <sup>2</sup> ).....	92
<b>FIGURA 4.5</b>	EJEMPLO PARA CALCULAR LA H <sub>MIX</sub> USANDO EL MODELO DEL CSIRO.....	133
<b>FIGURA 5.1</b>	PARTICIPACIÓN DE LAS PM <sub>10</sub> SOBRE EL IMPACTO TOTAL, SEGÚN LA UBICACIÓN DE LA FUENTE .....	171
<b>FIGURA 5.2</b>	PARTICIPACIÓN SOBRE EL IMPACTO TOTAL VS. DISTANCIA DE LA FUENTE.....	172



# LISTADO DE ACRÓNIMOS

<b>AFBC:</b>	Combustión a lecho fluidizado atmosférico
<b>BDUa:</b>	Uso de broncodilatadores, adultos asmáticos
<b>BDUc:</b>	Uso de broncodilatadores, niños asmáticos
<b>BEN:</b>	Balanço Energético Nacional
<b>BT:</b>	Benefit transfer
<b>CB:</b>	Bronquitis crónica
<b>CC:</b>	Coal Cleaning
<b>CCT:</b>	Clean Coal Technologies
<b>CFBC:</b>	Circulating Fluidized Bed Combustion
<b>CHA:</b>	Admisiones hospitalarias por causas cardíacas
<b>CM:</b>	Mortalidad crónica
<b>CRF:</b>	Funciones concentración-respuesta
<b>DALY:</b>	Disability-adjusted life year
<b>DAP:</b>	disposición a pagar
<b>DV:</b>	Depletion velocity
<b>EFCC:</b>	Externally Fired Combined Cycle
<b>ESP:</b>	Filtros de Aire Electroestático
<b>FBC:</b>	Combustión en Lecho Fluidizado (Fluidised Bed Combustion)
<b>FGD:</b>	Flue Gas Desulphurisation
<b>f<sub>pop</sub>:</b>	fracción de la población afectada
<b>GEI:</b>	Gases de efecto invernadero
<b>IC:</b>	intervalo de confianza
<b>IF:</b>	Mortalidad infantil
<b>IGCC:</b>	Gasificación Integrada en Ciclo Combinado
<b>IL:</b>	Tasa de Incidencia
<b>IPA:</b>	Metodologías de las Vías de Impacto

**IRR:** Tasa de incremento de riesgo relativo

**ISC:** Industrial Source Complex

**LLE:** Pérdida de expectativa de vida

**LRSa:** Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos asmáticos

**LRSc:** Síntomas del tracto respiratorio inferior niños asmáticos

**MA:** Mortalidad aguda

**mRAD:** Días de actividad restringida menor

**MRS:** Tasa Marginal de Sustitución

**netRAD:** Días de actividad restringida neta

**O&M:** Costes de operación y mantenimiento (O&M)

**OCDE:** Organización para la cooperación y el desarrollo económicos.

**ONG:** Organizaciones No Gubernamentales

**PAH:** Hidrocarburos aromáticos policíclicos

**PCC:** Combustión a carbón pulverizado

**PFBC:** Combustión a lecho fluidizado presurizado

**PIB per cápita:** Producto interior bruto per cápita

**PM:** Partículas suspendidas

**PPM:** Contaminantes primarios

**PPPGDP per cápita:** PIB per cápita en paridad de poder de compra

**QALY:** Quality-adjusted life year

**RAD:** Días de actividad restringida

**RHA:** Admisiones hospitalarias por causas respiratorias

**RUWM:** Robust Uniform World Model

**SCR:** Selective Catalytic Reduction

**S<sub>CRF</sub>:** Pendiente de la función concentración-respuesta

**SIG:** Sistema de información geográfica

**SNCR:** Selective Noncatalytic Reduction

**SPM:** Contaminantes secundarios

**SUWM:** Simplified Uniform World Model

**TSP:** Partículas totales en suspensión

**UC:** Costes unitarios

**USC:** Advanced Ultra-Supercritical Generation

**UWM:** Uniform World Model

**VAI:** Valor añadido por la industria

**VC:** Valoración contingente

**VOC:** Compuestos orgánicos volátiles

**VOLY:** Valor de un año de vida perdido

**VPF:** Value of preventing fatality

**VSL:** Valor de una Vida Estadística

**WDL:** Días de trabajo perdidos

**WTM:** Windrose Trajectory Model

**YOLL:** Años de vida perdidos

# ABSTRACT

---

The economic valuation of the externalities is a relevant method when it comes to assess the physical impacts and damage costs of airborne pollution from electricity production. It is in this context that the analysis of the Candiota power station case arises. Located in the southern state of "Rio Grande do Sul" (Brazil), this coal fired power plant has relatively high emission factors for particulates (PM), sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). As a consequence, damages to human health have been reported. The first objective of this research is to assess the external cost on health and climate change caused by the power station. The second, to evaluate the feasibility, from a social perspective, of a possible technological adaptation, capable of mitigating this impact. To this effect, a detailed analysis is presented beginning with pollutant emission. It is followed by atmospheric dispersion and quantification of the impacts and damages through the use of concentration-response functions (CRF) and unit costs. A "Bottom-up" approach is used, with the *Uniform World Model*, carried out by Joseph V. Spadaro (Spadaro, 1999). Due to the multiplicative nature of the analysis, the confidence intervals of the result are calculated assuming a lognormal distribution (uncertainty).

The results of this study reveal that the damage costs are large and some mitigations measures should be required. On the other hand, the external cost generated by the power station and the minimum investment needed when facing a possible technological adaptation show a feasible change in technology, when the external costs are internalized by the power stations costs.

**Keywords:** Candiota, air pollution, concentration-response function (CRF), externalities, external cost, environmental impact, uncertainty, sensitivity, electricity, Uniform World Model (UWM), mortality, morbidity, unit costs, climate change, alternative technology options, social benefit, avoided costs.

## **Capítulo 1 : Introducción**

## **1.1. Planteamiento del problema: Energía y sostenibilidad**

Toda sociedad decide a lo largo del tiempo qué producir, cómo producir y para quién producir. Con estas tres preguntas básicas se establece un conjunto de aspectos que refleja el grado de bienestar asumido por la sociedad. La esencia de la actividad económica consiste en la combinación de estas tres cuestiones, en función de los recursos de que dispone para soportar la producción de bienes.

Ahora bien, ¿cómo se organiza la sociedad para abordar dichas cuestiones y así organizar su producción? La decisión es tomada básicamente teniendo en cuenta la cantidad de recursos disponibles en un país y, obviamente, su escasez. Con esto se quiere decir que la producción de bienes y servicios de un país genera, en contrapartida, presiones sobre los recursos naturales disponibles. Por lo tanto, no cabe duda de que la estructura económica y la forma por la cual se organice la producción influyen, en mayor o menor medida, en la presión sobre los recursos naturales.

No ajena a este dilema y como cualquier otra actividad económica, la producción de energía se organiza de forma a responder estas cuestiones. La oferta de este recurso está estrechamente vinculada con el crecimiento y desarrollo de un país, por lo que un aumento de la calidad de vida posiblemente implicará un incremento del consumo energético. Siguiendo este postulado, la energía se ha posicionado como un importante recurso estratégico, sobre todo teniendo en cuenta que gran parte del consumo energético actual proviene de las llamadas “fuentes convencionales”, es decir, de aquellas cuyo insumo principal son los combustibles fósiles. No de forma aleatoria, este tipo de fuente resulta ser una de las principales responsables de numerosos impactos socio-ambientales. Por otro lado, no cabe perder de vista que todas las fuentes de energía conllevan impactos sobre el entorno. La generación a partir de combustibles fósiles impone, además de otros daños, impactos relacionados con las emisiones de contaminantes. La hidroelectricidad, en términos generales, produce impactos derivados de las inundaciones en áreas dedicadas a la construcción de los embalses. El listado es muy amplio, pero es lógico pensar que todas las fuentes de energía, como cualquier actividad antropogénica, traen consigo impactos sobre el entorno (sociales, medioambientales, etc.).

Según estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2008), de seguir la tendencia actual, la demanda mundial de recursos naturales provocaría que en 2050 el nivel de consumo de los recursos se eleve hasta alcanzar una cifra en torno



a un 40% superior de lo que el planeta podría soportar. Es evidente imaginar que la actual organización de los factores de producción conlleva una asignación poco eficiente de los recursos naturales disponibles en el mercado. Como consecuencia, se observa una pérdida de bienestar a la vez que se producen graves problemas medioambientales, muchas veces con múltiples influencias sobre la vida humana. Los principales impactos causados al medioambiente han llevado a las sociedades a replantear sus matrices productivas, reordenando el balance de las tres preguntas presentadas en el inicio de este capítulo. La importancia de los requerimientos hacia una economía sostenible afecta obviamente a la energía como parte del sistema productivo y ya no puede ser vista de forma dissociada de los problemas medioambientales y sociales que derivan de su cadena de valor. El problema reside en que la configuración de la matriz energética mundial, pautada en los combustibles fósiles, así como la tecnología empleada parecen resultar incompatibles con los retos en sostenibilidad que debe afrontar la sociedad contemporánea.

El sector energético es responsable de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, en adelante). La Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2008) prevé, entre 2005 y 2030, un crecimiento de un 55% de la demanda de la energía primaria a nivel mundial, produciéndose gran parte de este crecimiento en economías emergentes como China, India, Brasil y Rusia. Por este motivo, cabe pensar que uno de los principales desafíos que afronta la economía es cómo garantizar el aumento de la oferta de energía de forma sostenible. Si nos remitimos a las preguntas planteadas al principio de este capítulo, concluiremos que la cuestión aquí esbozada consiste en cómo producir la energía teniendo en cuenta los fundamentos del desarrollo sostenible. Conviene resaltar que este planteamiento energético no solo debe influir en la oferta, sino que también habría que establecer políticas de demanda como, por ejemplo, los parámetros de eficiencia energética. No obstante, la oferta es quizás el aspecto que más preocupaciones genera, debido al elevado nivel de inversión requerido para ampliarla, a la tecnología disponible, así como, en su caso, al coste del insumo. Todos estos aspectos muestran los motivos por los cuales resulta complejo el cambio de un modelo energético hacia otro cuyos cimientos estén conformados por aspectos de sostenibilidad. Por ende, dicha sostenibilidad dependerá no solo de nuevas fuentes de energía, sino que también será de fundamental importancia añadir la eficiencia ambiental en las fuentes convencionales.

De esta forma, los problemas energéticos a los que debe enfrentarse una nación se resumen en balancear los criterios de sostenibilidad, competitividad y de seguridad del suministro. El equilibrio de esta ecuación requiere que la planificación energética tenga en cuenta las consecuencias del calentamiento global y de la destrucción de la biosfera, sin mermar la competitividad del sector y garantizando la oferta de energía. La complejidad que envuelve a esta ecuación redonda en verdaderos paradigmas del crecimiento, y, por ende, en un cambio en el modelo energético que fuese capaz de introducir los aspectos sociales y medioambientales dentro de su función de producción. No cabe duda de que el sector tendrá que afrontar dichos retos hacia una búsqueda de modelos productivos innovadores que garanticen la oferta de energía a unos precios razonables.

En el caso específico de la energía eléctrica los retos son aún mayores. A nivel macro, entre 2006 y 2030, los países de la OCDE ralentizarán la demanda, situándose en aproximadamente un 1,1%, mientras que economías emergentes la aumentarían en un 146%, representando una tasa anual de crecimiento de un 3,8% (WEC, 2008). Este panorama plantea una encrucijada, puesto que la oferta mundial debería acompañar dicho crecimiento y a la vez abordar los aspectos de sostenibilidad mencionados anteriormente. Conviene resaltar en este sentido que la generación de electricidad responde a un 41% de las emisiones de GEI relacionadas con la quema de combustibles fósiles (IEA, 2011). Además, la energía eléctrica dispone de la particularidad de que no puede ser almacenada<sup>1</sup>, obligando a que, en la medida de lo posible, haya que acoplar las curvas de oferta y demanda. Por otro lado, al ser una fuente de energía final, su producción dependerá de otras formas primarias, como la energía potencial para una hidroeléctrica, el gas natural, el carbón, el petróleo para la termoelectricidad, el uranio en el caso de la nuclear, y el viento y el sol en el caso de la eólica y solar, respectivamente. La primera, dependiendo de su tamaño, puede ser considerada como renovable, habida cuenta de que los grandes proyectos requieren extensas áreas dedicadas a la construcción de los embalses. Las “minicentrales” y las centrales a bombeo son menos agresivas con el medioambiente. Por su parte, las centrales térmicas disponen de una producción más regular y con costes de partida en general inferiores a las grandes hidroeléctricas<sup>2</sup>. No obstante, tienen como contrapartida las altas emisiones de GEI y otros contaminantes producidos tras la quema de combustibles como el carbón, el gas o el petróleo. La nuclear, pese a no

---

<sup>1</sup> Cabe señalar que existen formas “indirectas” de almacenar la energía eléctrica como, por ejemplo, a través de los embalses de las presas hidroeléctricas, que almacenan la “energía potencial”.

<sup>2</sup> Las grandes hidroeléctricas también generan emisiones derivadas de la descomposición de la materia en el fondo de los embalses.

generar emisiones a la atmósfera, requiere medidas de seguridad especiales y tiene el inconveniente asociado con la gestión de los residuos radioactivos. Las fuentes de energía renovables o alternativas, que en los últimos veinte años han alcanzado un gran desarrollo, principalmente en países como Estados Unidos, Alemania y España, tienen su ventaja en el mínimo impacto medioambiental que provocan, tanto en concepto de emisiones como también en toda su cadena de valor. Por otro lado, los principales problemas son que muchas de ellas dependen de fuentes primarias intermitentes (como el viento), o bien que la tecnología empleada no ha alcanzado la paridad de red.

Como se ha podido comprobar, el mundo de la energía, en especial la electricidad, bajo un contexto de sostenibilidad, deberá enfrentarse a importantes retos. La necesidad imperiosa de minimizar los impactos socio-ambientales y de reducir las emisiones de contaminantes y GEI condicionará de forma decisiva la composición de la matriz eléctrica mundial. Dicha matriz, en sus características actuales, redonda en un *trade off* entre garantizar el suministro y mantener la competitividad con la reducción del impacto socio-ambiental derivado de su ciclo de vida. Esto ocurre, tal y como se ha comentado en los párrafos anteriores, porque los pilares del *mix* eléctrico se sostienen en los combustibles fósiles, cuyos impactos sociales y medioambientales son considerables. Además, en la mayoría de los casos, la tecnología empleada en las unidades de producción no es la más sostenible.

No ajeno a esta realidad se encuentra Brasil, cuya planificación energética deberá jugar un papel fundamental hacia el equilibrio entre la expansión de la oferta y la sostenibilidad general del sector. Este reto resulta aún más complejo al tenerse en cuenta los escenarios macroeconómicos y la mejora de los indicadores sociales detectados sobre todo a partir del año 2000. Prueba de ello es que, entre 2007 y 2008, el nivel de pobreza ha retrocedido en aproximadamente cuatro puntos porcentuales<sup>3</sup>, lo que ha supuesto un aumento en el consumo de energía eléctrica en un país donde 4,3 millones de domicilios no tienen acceso a la electricidad<sup>4</sup>. Además, las previsiones apuntan a que la demanda de energía aumentará un 2,3% para el periodo 2006-2030<sup>5</sup>. De esta manera, para hacer frente a este incremento, algunas fuentes como la

---

<sup>3</sup>CEPAL (2009)

<sup>4</sup>Base de datos "World Energy Outlook" – International Energy Agency (IEA). Disponible en: [http://www.worldenergyoutlook.org/database\\_electricity/electricity\\_access\\_database.htm](http://www.worldenergyoutlook.org/database_electricity/electricity_access_database.htm). Consulta realizada el 04 de febrero de 2010.

<sup>5</sup>IEA (2008)

termoelectricidad pueden aumentar su participación en la matriz eléctrica nacional, mayoritariamente dominada por la hidroelectricidad.

Por el lado de la oferta, solventar la demanda de energía eléctrica y garantizar las perspectivas de crecimiento han supuesto un nuevo reordenamiento de la planificación sectorial, fundamentalmente debido a los constreñimientos ofrecidos por la hidroelectricidad a la hora de ampliar la oferta de energía. Esta fuente es el principal motor del sector eléctrico (representa aproximadamente un 74%<sup>6</sup> de la generación de energía eléctrica) y tradicionalmente ha sido la responsable de suplir las demandas eléctricas del país. No obstante, pese a que Brasil es uno de los países con el mayor potencial hidroeléctrico del mundo y a que solamente un 37,3% de este potencial sea aprovechado para fines energéticos, su explotación parece emitir señales de agotamiento. Esto se debe a que gran parte del mencionado potencial se encuentra ubicado en cuencas con ecosistemas muy sensibles (cuenca del Amazonas y sub-cuencas)<sup>7</sup>. Los impactos ambientales derivados del aumento de la explotación del potencial en la cuenca del Amazonas podrían frenar la expansión de la hidroelectricidad.

El despliegue de la termoelectricidad<sup>8</sup> frente a una aparente paralización de la energía hidroeléctrica requiere un nuevo diálogo en cuanto a la sostenibilidad del sector eléctrico brasileño. Prueba de ello es la importancia que viene teniendo el gas natural para la matriz energética nacional, cuyas previsiones apuntan a que el consumo se duplicará entre 2006 y 2030<sup>9</sup>. Además, el reciente descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo (*pré-sal*), gas natural y la explotación de las reservas de carbón demuestran la tendencia de crecimiento de la termoelectricidad con respecto a la generación hidráulica. A su vez, el crecimiento de la termoelectricidad parece encender las alarmas de no tomarse las debidas precauciones tecnológicas y de control ambiental, en lo referente al aumento de la contaminación atmosférica y sus consecuencias para la salud humana y el medioambiente.

Para ir enfocando el objeto de estudio de esta investigación, nos centraremos en el carbón mineral y su aplicación con fines energéticos. El uso de este combustible

---

<sup>6</sup> EPE (2011)

<sup>7</sup> ANEEL (2005)

<sup>8</sup> Brasil posee actualmente 1.324 centrales termoeléctricas, de las cuales la gran mayoría utiliza combustibles fósiles como fuente primaria de energía. Fuente: Banco de Informações da Geração– Agência Brasileira de la Energía Eléctrica (ANEEL) – [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). (Consulta realizada el 10 de febrero de 2010).

<sup>9</sup> EIA (2009)

sigue siendo fuente de mucha controversia en todo el mundo, debido a los impactos socio-ambientales que puede producir. Los principales problemas medioambientales van desde vertidos a acuíferos, contaminación del suelo hasta emisiones de contaminantes (partículas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Es conveniente resaltar que actualmente se han desarrollado tecnologías y procesos de control que han sido capaces de reducir el impacto del aprovechamiento energético del carbón. Es en este contexto donde se sitúa el caso de la Central Termoeléctrica Presidente Médici (central de Candiota, en adelante) cuyo aprovechamiento energético del carbón puede estar produciendo una serie de afecciones tanto a la salud humana como también al medioambiente y al paisaje local. Sin embargo, hay que reconocer que las actividades que allí se desarrollan también son un importante soporte para la economía local, suponiendo la mayoría de los ingresos regionales y manteniendo un gran número de puestos de trabajo.

De esta forma, es muy importante definir el marco institucional y la escala del problema. Hay que observar, sin caer en posiciones arbitrarias, en qué escenario se inserta la sociedad en cuestión y si, obviamente, sus habitantes plantean el caso como un verdadero problema. Puede que la comunidad local no perciba el caso como un problema y no esté dispuesta a abandonar las fuentes de ingreso proporcionadas por la actividad, en aras de una mejor calidad ambiental. Además, hay que tener en cuenta los lineamientos estratégicos de la política energética del país, que podría estar apostando por un enfoque expansionista, sin tener en cuenta las externalidades de la energía. Como se puede observar, el problema no es de fácil solución pero se pretende plantear una aproximación con base en las medidas correctoras que mitiguen el daño, teniendo en cuenta la importancia económica de la actividad para la región de Candiota.

La clave de esta problemática es cómo hacerlo, es decir, de qué manera producir energía eléctrica de forma eficiente bajo un punto de vista social y ambiental, sin mermar la economía de la zona. En este sentido, para poder plantear las alternativas a esta cuestión, primero resultaría relevante comprender la magnitud del problema. Es decir, sin que se comprenda el alcance del mismo, difícilmente se podría establecer un parámetro de análisis entre el coste privado asociado (inversión) y la externalidad impuesta al medioambiente y a la sociedad. Esta información es de extrema relevancia para el planificador a la hora de valorar aquella alternativa más eficiente bajo un punto de vista social.

## 1.2. Hipótesis de trabajo

En términos generales, es de amplio consenso que la “matriz energética ideal” de un país o región es aquella que disponga de la mejor eficiencia productiva y a la vez genere el menor impacto ambiental posible. No obstante, tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, la realidad está muy lejos de ofrecer una respuesta fácil a un modelo energético sostenible. En ello intervienen una serie de variables que requieren tener en cuenta, no solo a corto plazo, todas las fuentes de energía disponibles.

El problema reside en el hecho de que la existencia de externalidades hace que el precio de la energía sea menor y, en consecuencia, su consumo e impacto ambiental sean más elevados. Esto implica por otro lado que, de no tenerse en cuenta las externalidades, la tecnología elegida no sería la más adecuada bajo un punto de vista de una asignación óptima.

En este sentido, a partir del caso de Candiota, queremos demostrar que al tenerse en cuenta las externalidades generadas por la producción de energía, una nueva composición tecnológica podría resultar eficiente en términos de sostenibilidad, sin que sea necesario abandonar la actividad económica de la minería. No conviene perder de vista que, quizás, enmarcar el caso de la central termoeléctrica de Candiota solamente en función de los impactos que genera, sin tener en cuenta la importancia de la actividad para la economía de zona, podría suponer una visión miope del problema, dado que el cierre de la misma podría resultar en una asignación no eficiente. Para obrar en este sentido y llegar a una noción de equilibrio, conviene sopesar cuidadosamente el bienestar asociado con la satisfacción de determinadas necesidades y el coste de acometer una determinada medida correctora.

De esta forma, a partir de estas premisas de partida, la hipótesis de trabajo que se plantea en esta tesis doctoral se formula en los siguientes términos:

“La valoración económica de las externalidades y su incorporación en el precio de la energía crearían una asignación óptima del recurso a través de un nuevo reordenamiento tecnológico que, en cualquier caso, reduciría el impacto socio-ambiental. Esta nueva composición tecnológica sería más eficiente bajo criterios de sostenibilidad, al permitir la continuidad de la actividad económica (minería) en la

región de Candiota sin que esa decisión suponga elevados impactos (externalidades) sobre la población local”.

### 1.3. Objetivo general

El planteamiento al que se circunscribe esta investigación no pretende establecer un enfoque unívoco con respecto a lo que ofrece la economía a la hora de tratar los principales problemas ambientales. Azqueta (2007) señala que: *Es imposible (...) tratar de abarcar la problemática ambiental desde la perspectiva de una única disciplina científica*, siendo la economía una de las materias capaces de colaborar con la problemática ambiental, junto con otras disciplinas científicas.

No se pretende, por lo tanto, establecer una crítica hacia cualquier sector productivo vinculado al mundo de la energía, sino identificar eventuales herramientas y posibilidades que, a su vez, sean capaces de orientar al planificador en cuanto a la alternativa más eficiente bajo una perspectiva social.

El análisis económico aplicado a la solución de los problemas ambientales debe incorporar facetas y criterios de otras disciplinas, como la ecología o incluso la medicina. El juicio de valor que incorpora el economista en el análisis de los principales problemas ambientales debe ser continuamente retroalimentado y no es capaz por sí solo de suministrar todas las herramientas y explicaciones para la solución de los mismos. En este contexto, nos encontramos ante el debate entre la producción de energía y los impactos ambientales, sociales y económicos que redundan de su actividad. La energía, en cuanto soporte estructural, es condición *sine qua non* para el desarrollo económico de un país pero la tecnología empleada, los fines de la misma y cuándo utilizarla es crucial en el planteamiento ambiental.

Tal y como hemos mencionado en el apartado anterior, los impactos causados por la generación de energía a partir de los combustibles fósiles son los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero o de otros contaminantes como las partículas en suspensión. No obstante, las economías siguen siendo muy dependientes de los recursos fósiles, hecho que no cambiará a medio-largo plazo según previsiones de la Agencia Internacional de la Energía<sup>10</sup>. Tales recursos son clave para el desarrollo económico de muchos países. Las energías

---

<sup>10</sup>IEA (2008)

renovables, por otro lado, vienen alcanzando un importante desarrollo y deberemos seguir alentándolas, aunque también resulta fundamental analizar posibilidades de utilización de los recursos fósiles, sin que esto signifique un deterioro ambiental.

En este sentido, parece evidente la existencia de un *trade-off* entre garantizar el abastecimiento de energía y reducir la contaminación (externalidades) vinculada con la producción de energía. Esta preocupación forma parte de la agenda política tanto de los países desarrollados como de los emergentes o en vías de desarrollo, dado que las presiones sectoriales hacia un precio de la energía más barato entran en conflicto con los aspectos regulatorios dirigidos a mitigar los efectos negativos de la producción de energía a partir de las fuentes fósiles convencionales. Por otro lado, las fuentes convencionales, al no incorporar las externalidades derivadas de su ciclo de vida, disponen de un precio más bajo con respecto a los nuevos desarrollos tecnológicos o las fuentes de energía renovables. Este problema parece ser más acentuado en países emergentes, donde, niveles más bajos de renta hacen que la población no esté dispuesta a aceptar una energía más cara en pro de una mejor calidad ambiental o mejora en las condiciones de vida (salud). De esta forma, el desarrollo de una política racional debe buscar el equilibrio entre la reducción de los impactos socio-ambientales y los beneficios de proveer energía a un precio razonable. Además, el valor al medioambiente que otorga una sociedad suele variar en función del nivel de desarrollo económico del país. Sociedades con desarrollo económico avanzado suelen valorar más la biosfera, su valor intangible y el disfrute colectivo de la misma. Por otro lado, las economías en vías de desarrollo priman la utilización “productivista” de la biosfera, debido fundamentalmente a que muchas de las necesidades básicas de sus habitantes no están cubiertas.

Es en este contexto donde se ubica Brasil, en lo referente a planificación energética. Las necesidades energéticas para sustentar el crecimiento económico y los aspectos sociales/ambientales son factores clave para el planificador. Los criterios ambientales y el valor que la sociedad brasileña otorga al medioambiente son, en cualquier caso, distintos a la realidad de los países con elevados niveles de desarrollo. Por este motivo, el análisis de los problemas ambientales en los países en vías de desarrollo debe tener en cuenta el peso de algunas variables que se verán influenciadas por el contexto socio-económico.

Teniendo en cuenta esta problemática y las variables que influyen en ella, así como las posibles vías de solución, plantearemos el caso de estudio de la central



termoeléctrica Presidente Médici (796MW de capacidad instalada), más conocida como “Candiota”, debido a su localización en el municipio de Candiota. Este municipio forma parte del estado de Rio Grande do Sul y dispone de una población de aproximadamente 8.000 habitantes, cuya región se caracteriza por tener la mayor reserva de carbón del país. Además del recurso de la minería, están presentes emprendimientos relacionados con la utilización energética del mismo, en especial la actividad cementera y la generación de energía. Por este motivo, la región del municipio de Candiota es una zona muy dependiente de la minería. Esta actividad genera la mayor parte de los ingresos y sustenta de forma directa e indirecta la mayoría de los puestos de trabajo. Por otro lado, la producción de electricidad podría estar imponiendo externalidades sobre el medioambiente y la salud humana. La baja calidad del carbón encontrado en las minas y la tecnología empleada son las principales razones por las cuales la contaminación parece alcanzar niveles alarmantes. No obstante, la sociedad local, ante la carencia de algunas necesidades básicas y la ausencia en muchos casos de la presencia del Estado, puede primar como criterio de decisión el valor social que aporta la actividad (creación de puestos de trabajo, etc.). A nivel regional/nacional las necesidades energéticas y, por ende, de crecimiento del país pueden ser los principales motivos por los cuales la población al final decida explotar el recurso disponible en la región al menor coste posible.

Las características asociadas con el caso de estudio de la central de Candiota permitirían tener una aproximación, aunque individualizada, de los *trade off* que podrían derivar del equilibrio de los ámbitos generales de la sostenibilidad. Cuando hablamos de los ámbitos generales de la sostenibilidad, el estudio de este caso nos remite hacia un nuevo desafío que proviene de las características de la región estudiada: la importancia de la actividad económica (minería) para la población y región afectadas. Con eso queremos decir que, pese a los supuestos impactos socio-ambientales causados por la central, los efectos positivos sobre la economía de la zona son un criterio a tener en cuenta por parte del planificador. Como se verá en los capítulos que siguen, la minería del carbón trae consigo efectos multiplicadores sobre la economía local, lo que obliga no solo a pensar en una solución que elimine por completo los impactos sobre la salud y que merme la actividad económica de la zona, sino también en aquella que equilibre ambos factores bajo un punto de vista social.

La pregunta a la que pretendemos responder en esta investigación es: ¿Cuál es la alternativa que mejor podría equilibrar los tres ámbitos fundamentales de la sostenibilidad? Para ello, necesitaremos valorar económicamente las externalidades

causadas sobre la salud humana, plantear las distintas alternativas que podrían permitir su mitigación, así como el coste de la inversión asociada con cada una de ellas. Posteriormente, se discutirá en términos del bienestar social que genere cuál de ellas resultaría más eficiente.

Siguiendo con este hilo conductor, el objetivo general de esta investigación será brindar informaciones adicionales al planificador en el sentido de que este último pueda elegir la alternativa que más beneficio social aporte a la región. Es decir, una vez valoradas las externalidades y en función de los costes para acometer las distintas alternativas mitigadoras, se ofrecerán pautas que orienten al planificador en el proceso de toma de decisiones.

#### **1.4. Objetivos específicos**

Como se ha señalado en el apartado anterior, el objetivo central de esta investigación es ofrecer pautas que orienten al agente tomador de decisiones acerca de la mejor alternativa que, bajo un punto de vista social, ofrezca la mejor solución al problema. Para ello, con carácter específico, antes de plantear las distintas alternativas que el planificador podría tener a su disposición, resulta fundamental conocer la magnitud del problema a través de la valoración económica de las externalidades de la energía asociadas con la central de Candiota. En este caso, se pondrá énfasis en los impactos sobre la salud humana y el cambio climático (emisiones de GEI). Acto seguido, una vez se hayan valorado económicamente las externalidades producidas por la central, se plantearán aquellas alternativas hipotéticas dirigidas a la mitigación del daño, junto con el coste privado (inversión, O&M etc.) de cada una de ellas y el beneficio social que supondría de aplicarse dichas medidas. Los escenarios propuestos son: una mejora tecnológica cambiando el sistema de combustión a lecho fluidizado (*upgrade*), usos de sistemas de control de emisiones de contaminantes, conversión de la central a IGCC y adaptación de la misma a gas natural (*repowering*). Para cada una de estas alternativas se estudiarán los costes privados asociados, es decir, la inversión que debería acometerse sumada a los costes de O&M y de consumo de combustible. Además, en función de las emisiones evitadas, se estimará el beneficio social resultante de cada una de las alternativas planteadas.

Según lo expuesto arriba, los objetivos específicos son:

- Valorar económicamente el estado actual de las externalidades asociadas con la producción de energía eléctrica de la central termoeléctrica Candiota.
- Identificar las distintas alternativas que permitirían mitigar dichas externalidades.
- Estimar la inversión, costes de O&M y consumo de combustible vinculados con cada alternativa planteada.

## **1.5. Estructura de la investigación**

Para atender al objetivo propuesto, esta investigación está dividida en siete capítulos. El capítulo dos presenta las características del caso de estudio partiendo desde la configuración de la matriz energética brasileña, hasta considerar los aspectos sociales, medioambientales y económicos de la región de Candiota y su relación con la minería del carbón. En este capítulo nos ha parecido oportuno, antes de entrar en la descripción del caso de estudio, contextualizar el escenario energético brasileño poniendo énfasis en la generación de electricidad. Este punto de partida será de fundamental relevancia para comprender el problema planteado en la investigación y sobre todo la problemática asociada con la producción de energía y la sostenibilidad. Por último, se describen las características de la región de Candiota y los impactos socio-ambientales que genera la actividad.

En el capítulo tres, se analiza el estado de la cuestión en lo que se refiere a los modelos y estudios relacionados con la valoración de las externalidades de la energía. El capítulo cuatro plantea el marco metodológico en que se asienta la investigación. En este capítulo, se ofrecen los detalles del modelo “Uniform World Model” (UWM) que ha sido utilizado para valorar las externalidades de la energía. Además, de cara a la validación del método elegido, se plantea una comparación entre los resultados del UWM y aquellos obtenidos en otros modelos y estudios. Por último, se detallan de forma exhaustiva los datos de entrada requeridos por el modelo. Dichos datos incluyen los parámetros técnicos de la central (altura de la chimenea y temperatura y velocidad de salida de los gases), los datos de la población afectada (local y regional), la estructura de las funciones concentración-respuesta, los aspectos asociados con la valoración monetaria de las externalidades (costes unitarios de cada aspecto de salud) y los datos meteorológicos.

El capítulo cinco está dedicado al análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el UWM. Una vez conocidos los datos de entrada utilizados en el UWM, se exponen los resultados obtenidos según las distintas formas de presentarlos. También llevamos a cabo en este capítulo un exhaustivo análisis de incertidumbre y sensibilidad de los resultados. Para ello, primero hemos evaluado la incertidumbre en los costes externos estimados para la central de Candiota, a partir de las distintas fuentes de incertidumbre asociadas con la metodología del UWM. En un segundo momento, según las distintas fuentes de variabilidad sobre los resultados, hemos realizado el análisis de sensibilidad. A tal efecto, se plantean distintos puntos de sensibilidad y, de este modo, hemos evaluado la variabilidad sobre los resultados.

El capítulo seis, a partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, analiza el impacto de la actividad sobre la economía de la zona y las distintas alternativas tecnológicas dirigidas a mitigar los impactos. El impacto sobre la economía de la región ha sido estimado a partir del multiplicador keynesiano local. En este capítulo, también se ha estimado el beneficio social que aportaría cada opción tecnológica y el coste total (inversión, O&M y costes del consumo del combustible) necesarios para acometerlas, en función de diferentes escenarios de actuación en un contexto de incertidumbre.

Por último, en el capítulo siete, se presentan las conclusiones del estudio poniendo énfasis en los aspectos que podrían ser relevantes para facilitar el proceso de toma de decisiones por parte del planificador.

## **Capítulo 2 : La energía en Brasil y el caso de estudio de Candiota**

## **2.1. Introducción**

El objetivo de este capítulo es ofrecer una breve descripción del sector de la energía en Brasil, poniendo énfasis en el caso de estudio de Candiota y en la actividad de la minería. Esta contextualización será relevante para comprender la problemática planteada en esta investigación, partiendo desde un nivel macro (sector de la energía y matriz energética brasileña) hasta llegar a analizar las características sociales, ambientales y económicas de la región de Candiota.

De esta forma, el capítulo está estructurado en dos partes fundamentales. La primera ofrece una breve descripción de la matriz energética brasileña abordando las principales fuentes de energía como son la electricidad, el petróleo, el carbón y el gas natural, entre otras. Los datos utilizados en esta parte provienen básicamente del Balanço Energético Nacional (BEN), (EPE, 2011), elaborado por la Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que es un organismo público encargado de realizar estudios que sirvan de apoyo para llevar a cabo la planificación energética brasileña. La segunda parte de este capítulo ofrece una descripción del caso de estudio de Candiota, enfocando los aspectos relacionados con la importancia de la minería para la zona y los impactos que dicha actividad impone al medioambiente y a la salud de la población.

## **2.2. La matriz energética brasileña: Visión general en 2010**

La matriz energética brasileña se caracteriza por disponer de un gran abanico de posibilidades en lo que se refiere a la producción de energía. Este potencial ofrece una amplia oferta de energía, siendo aproximadamente un 86% de origen renovable<sup>11</sup>.

En 2010, destacó el aumento de la participación de la energía eólica y del biodiésel, cuya producción aumentó, por ejemplo, con relación a 2009 un 75,8% y un 49,1%, respectivamente (EPE, 2011). Otro aspecto que merece ser destacado es la transformación de etanol a partir de la caña de azúcar, que aumentó, específicamente con relación a 2009, su producción en un 7,1%, pese a que la producción de caña de azúcar se haya mantenido constante<sup>12</sup> (EPE, 2011). También de forma puntual con

---

<sup>11</sup>Según estimaciones de la Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2011), la oferta interna de energía tiene un carácter predominantemente renovable (86%). En este cálculo, se incluyen: un 74% de hidráulica, 0,4% de eólica, 4,7% de biomasa y un 6,5% de las importaciones, que son esencialmente de carácter renovable.

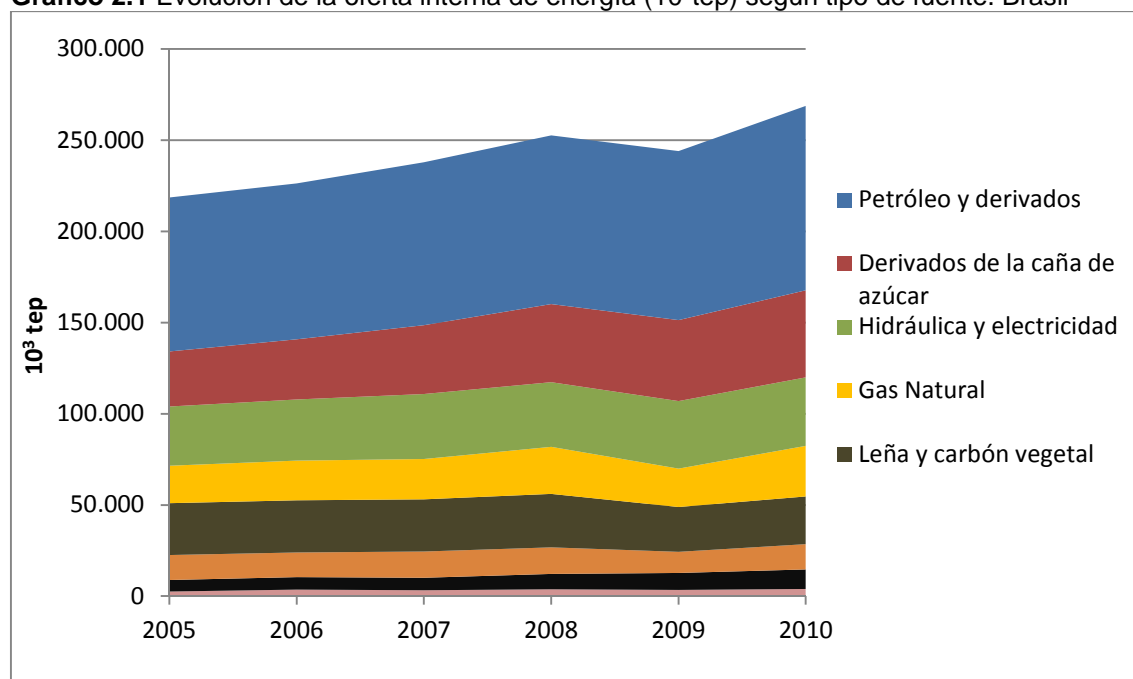
<sup>12</sup>Se observó un incremento de un 0,8% en la producción agrícola de caña de azúcar.

respecto a 2009, hubo un aumento de la oferta de electricidad (un 8,4% con relación a 2009), y lo mismo ocurrió con el consumo final, que aumentó un 7,8% con relación al mismo periodo. La producción de petróleo y gas natural también supuso un incremento específico para 2010, alcanzando un 5,4% y 8,5% con relación al ejercicio anterior. El carbón, predominantemente utilizado en la generación de energía eléctrica y siderurgia, también ha seguido una senda de crecimiento con respecto, por ejemplo, a 2009, sobre todo debido a la recuperación de la industria siderúrgica (EPE, 2011).

Partiendo de la oferta interna de energía (véase

Gráfico 2.1) se observa que el petróleo y derivados son los que más participación tienen, seguidos de los derivados de la caña de azúcar. A modo de ejemplo, conviene mencionar el crecimiento de casi todas las fuentes de energía entre 2009 y 2010.

**Gráfico 2.1** Evolución de la oferta interna de energía ( $10^3$ tep) según tipo de fuente. Brasil



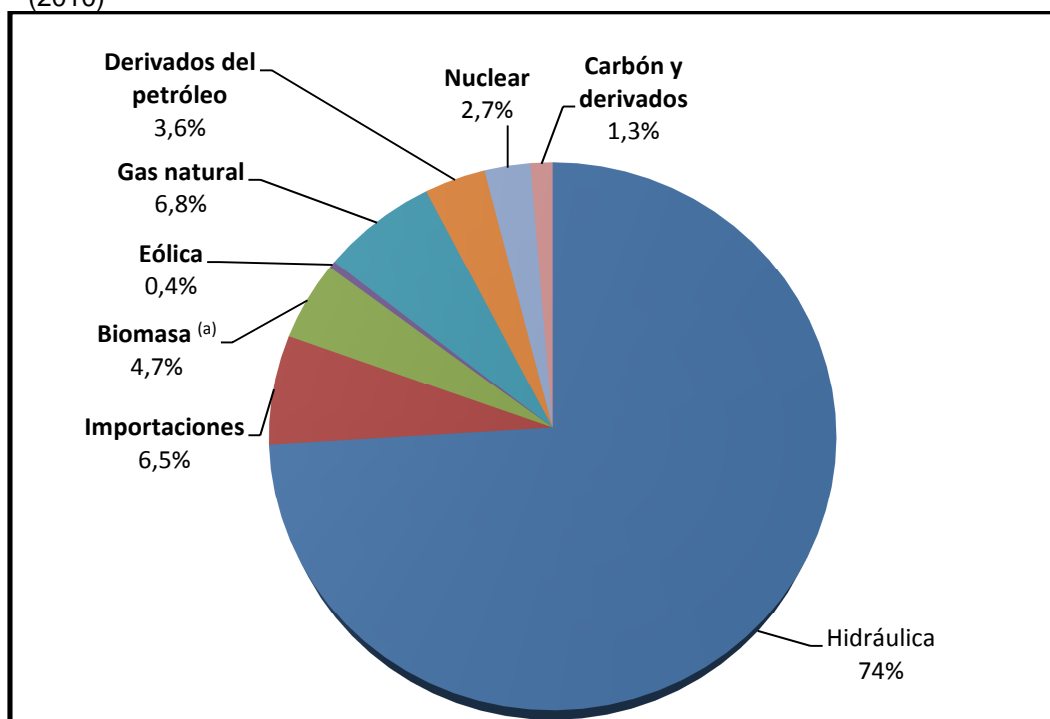
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BEN 2010 (EPE, 2011)

Tras esta breve explicación sobre los principales avances presentados en la matriz energética brasileña en 2010, se presentará en los apartados que siguen un análisis detallado de las principales fuentes de energía.

### 2.2.1. Energía eléctrica

La matriz eléctrica brasileña (generación) está fundamentalmente condicionada por la hidroelectricidad. En el Gráfico 2.2 podemos observar que la misma responde en gran parte a la oferta interna de energía eléctrica (74%) y refleja el gran potencial e importancia de esta fuente para el sector eléctrico. Hay que señalar que la clasificación brasileña considera la energía hidráulica en todas sus formas como un recurso renovable, sin hacer distinciones en cuanto al tamaño y capacidad de las hidroeléctricas. La importancia de la energía hidráulica en Brasil se explica principalmente por el potencial que tienen los ríos y por la topografía brasileña. A pesar de que las emisiones de GEI no son considerables, la energía hidráulica puede provocar grandes impactos ambientales en el proceso de construcción de hidroeléctricas, además de que puede suponer el desplazamiento de un gran número de poblaciones. A modo de ejemplo, la hidroeléctrica de Tucuruí, inaugurada en 1984, inundó un área correspondiente a dos veces la bahía de Guanabara, en Río de Janeiro. Por otro lado, la hidroeléctrica de Itaipú modificó paisajes como el de las Sete Quedas, una riqueza natural existente antes de la presa.

**Gráfico 2.2** Composición de la oferta interna de energía eléctrica por fuente (%). Brasil (2010)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BEN 2010 (EPE, 2011)

*Nota: La biomasa incluye la leña, bagazo de caña de azúcar, licor negro (residuo formado tras la transformación de madera en celulosa) y otros residuos.*



La generación de energía eléctrica alcanzó en 2010 509,2 TWh (Tera Watts/hora)<sup>13</sup>. Para tener una idea al respecto, dicha generación es un 10% superior con relación a 2009. La generación hidráulica supuso, en el mismo periodo, un aumento del 3,7% (2009-2010). Desde mediados de los años 70 del siglo pasado, la capacidad instalada de generación térmica poseía una composición relativamente estable en la matriz energética brasileña. A partir de finales de la década de los 90 del siglo pasado, su participación creció de forma sustancial, debido a la incorporación de centrales termoeléctricas y de autoprodutores. Como se puede deducir del Gráfico 2.2, esta última fuente responde a un 19% de la oferta de energía eléctrica. En términos de capacidad instalada, a finales de 2010, las centrales hidráulicas abarcaban un 71,2% del total, seguidas de las térmicas con un 26,2%. La nuclear y la eólica completan la lista con un 1,8% y 0,8%, respectivamente.

Respecto al consumo, a título ilustrativo, entre 2009 y 2010 hubo un incremento general de un 7,8%. El sector industrial avanzó un 9,9% y el residencial un 6,6% en el mismo periodo. Los demás sectores<sup>14</sup> juntos crecieron un 4,4% en 2010. Otro hecho destacable es la generación térmica a gas natural, que tuvo un fuerte crecimiento (180%) con relación a 2009, habida cuenta del aumento de la demanda y del hecho de que no haya sido un año hidrológico favorable<sup>15</sup>. La gradual incorporación del gas natural a la matriz energética brasileña ha hecho que actualmente esta fuente represente un 9% de la producción total de energía primaria. También destaca el carbón, que aumentó de forma considerable su participación puesto que, por ejemplo entre 2009-2010, hubo un incremento de un 28,3% del consumo para la generación de electricidad.

La generación nuclear en Brasil está compuesta por dos centrales - ANGRA I y II- con una capacidad instalada de 2.007 MW. Además, conviene resaltar que el país posee la sexta reserva mundial de uranio.

---

<sup>13</sup>No incluye las importaciones, que ascienden a 35,9 TWh (2010).

<sup>14</sup>Comercial, agropecuario, público y transportes.

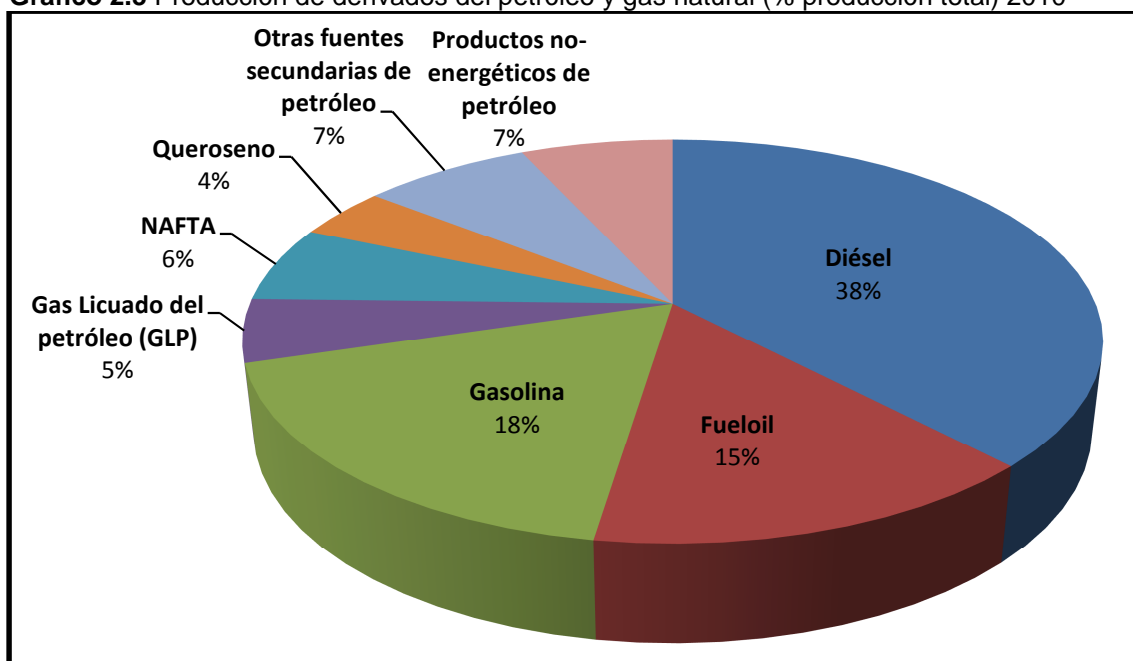
<sup>15</sup>Cuando las condiciones hidrológicas no son favorables, las térmicas juegan un papel complementario para cubrir las diferencias dejadas por la hidráulica.

### 2.2.2. Petróleo y derivados

En 2010, la producción de petróleo fue del orden de 106.439.000 tep<sup>16</sup>. A modo ilustrativo dicha producción fue un 5,4% superior con relación a 2009. Además, durante el mes de diciembre de 2010, alcanzó la cifra récord de producción de 2,18 millones de barriles diarios (EPE, 2011). Conviene resaltar que aproximadamente un 91,2% de esta producción tiene origen marítimo (*off-shore*), siendo solo el estado de Río de Janeiro responsable de un 87% de la producción *offshore*. Las reservas totales de petróleo en Brasil son del orden de 4,5 mil millones de m<sup>3</sup>.

En 2010 la producción de los derivados de petróleo<sup>17</sup> se mantuvo constante (ej. variación de un 0,12% respecto a 2009) y alcanzó 96.017.000 tep. De la producción total de derivados, el diésel supone un 38% de la misma, mientras que la gasolina y el fueloil responden a un 18% y un 15%, respectivamente (véase Gráfico 2.3).

**Gráfico 2.3** Producción de derivados del petróleo y gas natural (% producción total) 2010



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BEN 2010 (EPE, 2011)

Se observa una reducción de la producción de fueloil, debido a que viene siendo sustituido gradualmente por el gas natural en la generación de energía eléctrica. Reflejo de este hecho es que, entre 2001 y 2010, hubo una caída de un 25% en la producción de este combustible. Al igual que la producción, el consumo también ha sufrido una caída considerable (un 58% menos respecto a 2001).

<sup>16</sup>Tonelada equivalente de petróleo.

<sup>17</sup>Incluye los derivados del gas natural.

En términos del consumo de derivados del petróleo, conviene resaltar que solo el sector de transportes abarca un 53,1% del total (2010). Para hacerse una idea, en 2010, un 80% del diésel producido fue destinado a este último sector, seguido del uso agropecuario con un 14%. La carencia de otras infraestructuras como ferrocarriles y navegación fluvial hace que la mayoría del transporte de mercancías se realice por carretera, donde el diésel resulta ser el principal combustible.

### 2.2.3. *Gas natural*

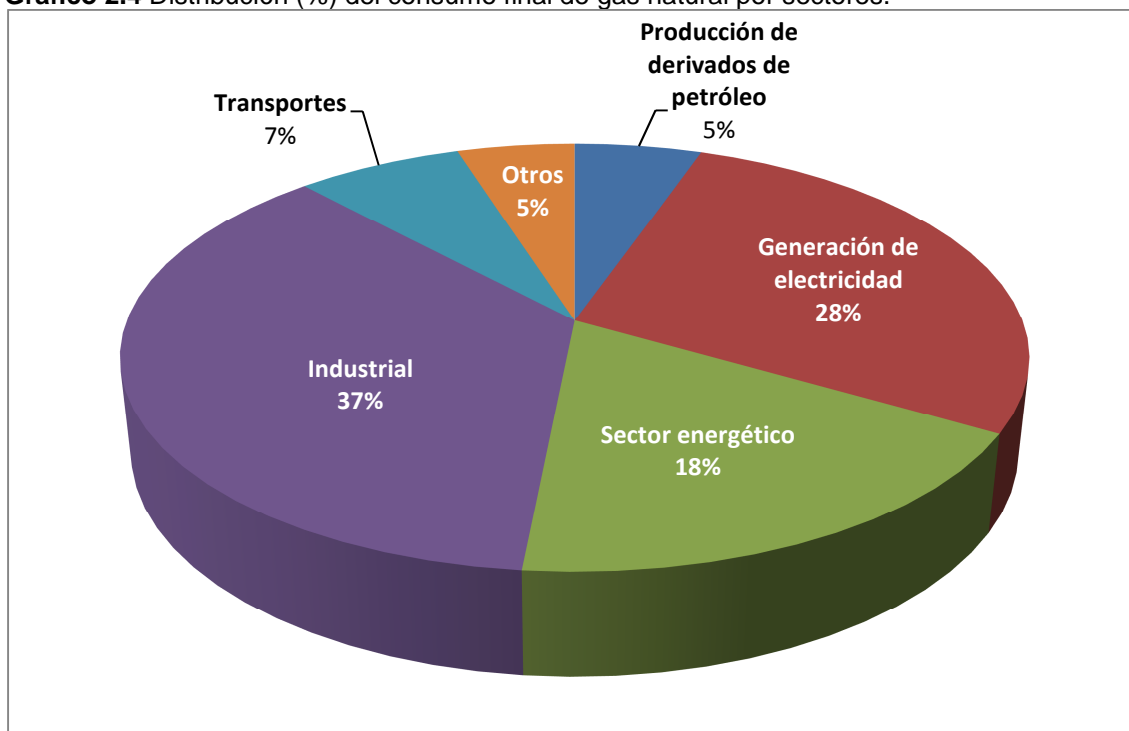
En 2010, la producción diaria de gas natural alcanzó 62,8 millones de m<sup>3</sup> (ej. un 8,5% superior con relación a 2009). Las importaciones diarias ascendieron a aproximadamente 34,6 millones de m<sup>3</sup> (2010). Además, a título ilustrativo, en 2010 la gran demanda de este recurso para la generación de electricidad ha impulsado el aumento del gas en la matriz energética. Como se puede observar en el Gráfico 2.4, el principal uso del gas natural se da en el sector industrial (un 37% del consumo en 2010), seguido de la generación de electricidad con un 28% y del sector energético<sup>18</sup> con un 18%. El sector de los transportes supone un 7% del consumo de gas natural. Las reservas totales de gas natural acumulan 824,7 mil millones de m<sup>3</sup> (2010).

Del monto asociado con el consumo industrial de gas natural, un 25% se realiza en el sector químico, un 13% para la producción de hierro y acero y un 12% en la industria cerámica (datos relativos al 2010).

---

<sup>18</sup>Se trata de la energía consumida en los centros de transformación y/o en los procesos de extracción y transporte interno de los productos energéticos en su forma final (EPE, 2011).

**Gráfico 2.4** Distribución (%) del consumo final de gas natural por sectores.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BEN 2010 (EPE, 2011)

#### 2.2.4. Derivados de la caña de azúcar

La caña de azúcar ha sido un producto emblemático para la economía brasileña. Este recurso pasó de ser la principal materia prima para la producción de azúcar, una de las mayores fuentes de ingreso del Brasil colonial, a convertirse en una de las más importantes fuentes energéticas del país a partir de la segunda mitad de la década de los setenta del siglo pasado. En Brasil, un 1% de las tierras cultivables (4,5 millones de hectáreas) son destinadas al cultivo de la caña de azúcar, configurándose como el mayor productor mundial. A modo de ejemplo, en 2010, los productos resultantes de la caña de azúcar supusieron un 18% de la oferta brasileña de energía.

El principal producto derivado de la caña de azúcar es el etanol, que es mezclado con la gasolina. La producción de etanol ganó fuerza a partir de 1975 con la creación del programa “Pró-álcool”, que buscaba reducir la dependencia energética a partir de la crisis del petróleo. Mediante el fomento estatal, la producción alcanzó niveles considerables, convirtiéndose en un importante elemento para el sector del transporte (sobre todo en vehículos ligeros). Para tener una idea al respecto, en 1984, el 94,4%<sup>19</sup> de la fabricación de vehículos ligeros era de coches movidos por alcohol.

<sup>19</sup> Fuente: <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/> (Unión de la Agroindustria de la Caña de Azúcar del Estado de Sao Paulo). Consulta realizada el 09 de febrero de 2012.

En 2010, la producción de etanol alcanzó 27.962.558m<sup>3</sup>, suponiendo, por ejemplo, un aumento de un 7,1% con relación a 2009. Cabe resaltar que aproximadamente un 75% del etanol producido proviene del caldo de la caña, los restantes 25% provienen del *melaço* generado por la producción de azúcar (rendimiento próximo a 335 l/t de *melaço*).

#### 2.2.5. *Leña y carbón vegetal*

Los datos del balance energético nacional (EPE, 2011) demuestran que el uso de la leña como recurso energético aún es significativo, a pesar de que viene decreciendo a lo largo de los años. Su uso se da principalmente en las llamadas “carvoarias” (33%) para producir el carbón vegetal y en las residencias para cocer alimentos. Prueba de ello es que, en 2010, el sector residencial consumió 23,5 millones de toneladas de leña, lo que supone un 28% de la producción total. Además, un 27% de la producción total de leña se destina al sector industrial para la fabricación fundamentalmente del arrabio<sup>20</sup>.

#### 2.2.6. *Carbón*

Dada la relevancia del carbón para este caso de estudio, se presentará, en los dos apartados que siguen, el estado actual de este recurso no solo para el escenario brasileño, sino también de su uso a nivel mundial. Cabe recordar que la minería del carbón es una actividad económica muy importante para la región de Candiota y por eso resulta ilustrativo entender con algo más de detalle los entresijos de esta fuente.

El carbón mineral, o simplemente carbón, es una roca sedimentaria<sup>21</sup> con gran concentración de carbono, hecho que le otorga un gran poder calorífico. Gran parte de los yacimientos se formaron durante el periodo carbonífero, entre 290 y 360 millones de años. Esta formación está estrechamente vinculada con la acumulación de materia orgánica (WCI, 2005).

Los tipos de carbón varían desde la turba, cuya materia orgánica presenta poca alteración, hasta la antracita, que es el mineral con mayor grado de evolución. En el Anexo 3, se exponen las clasificaciones aplicadas actualmente al carbón, según su tipología y porcentaje de carbono fijo.

---

<sup>20</sup> El arrabio es un material obtenido tras la reducción del hierro. Se utiliza en la fabricación de acero.

<sup>21</sup> Una roca sedimentaria es el conjunto de varias rocas formadas por la acumulación de sedimentos. Sus principales características son la estructura estratificada que presenta y que contiene generalmente fósiles.

La existencia de grandes yacimientos y el coste relativamente bajo de su extracción/transformación, en comparación con otros recursos fósiles, ha masificado su uso como fuente primaria para la producción de energía eléctrica, hasta configurarse como uno de los principales peldaños de la matriz energética mundial. No obstante, el aprovechamiento energético del carbón ha sido objeto de controversias debido al impacto que puede causar cuando la tecnología empleada no es la más eficiente bajo un punto de vista social y medioambiental. El punto focal del debate relacionado con el uso del carbón con fines energéticos es el elevado coste ambiental y social que redundaría de su ciclo de vida. Según datos de la asociación ecologista Greenpeace<sup>22</sup>, la quema del carbón durante la generación de energía eléctrica es responsable de la emisión de 11.000 millones de toneladas de gases de efecto invernadero (GEI, en adelante), representando un 41% sobre el total de todas las emisiones producidas por combustibles fósiles y un 72% sobre el total de las emisiones provenientes de centrales generadoras de energía eléctrica. Las previsiones para 2030 apuntan a que este valor se incrementará en un 60%. Por otro lado, se estima que el coste externo producido por termoeléctricas a carbón haya alcanzado unos 356.000 millones de dólares en 2007.

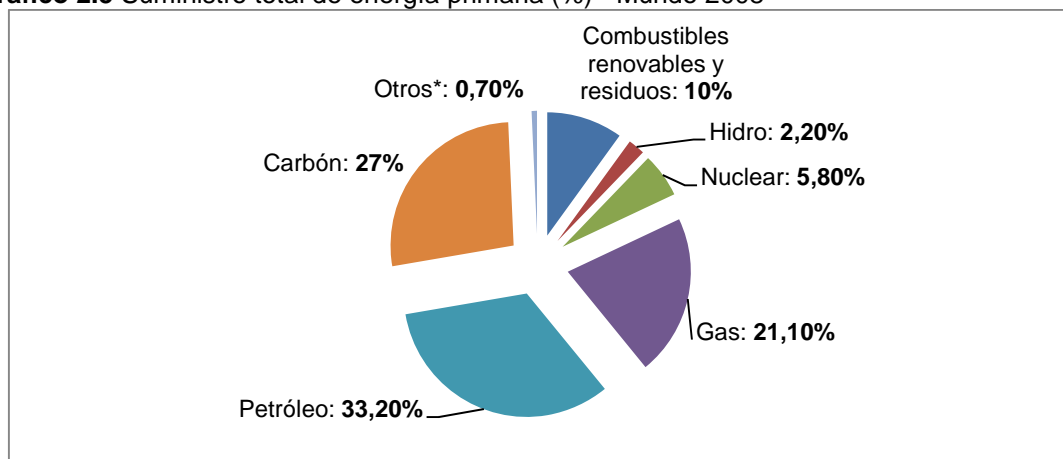
#### *2.2.6.1. Carbón: estado a nivel mundial*

A nivel mundial, el carbón sigue teniendo una fuerte presencia en la matriz energética, tanto bajo la perspectiva de energía primaria como también por su utilización en la generación de energía eléctrica. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2010), el carbón es responsable de un 27% (véase Gráfico 2.5) del suministro total de energía primaria. Esta participación prácticamente se mantuvo constante desde los años 70, cuando el porcentaje alcanzaba un 24,5%. Es conveniente resaltar que se trata de la segunda fuente primaria de energía con más influencia en el *mix* energético, siendo superada solamente por el petróleo.

---

<sup>22</sup> Greenpeace (2008)

**Gráfico 2.5** Suministro total de energía primaria (%) - Mundo 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Internacional de la Energía (OECD/IEA, 2010)

\*Otros incluye energía geotérmica, solar, eólica, etc.

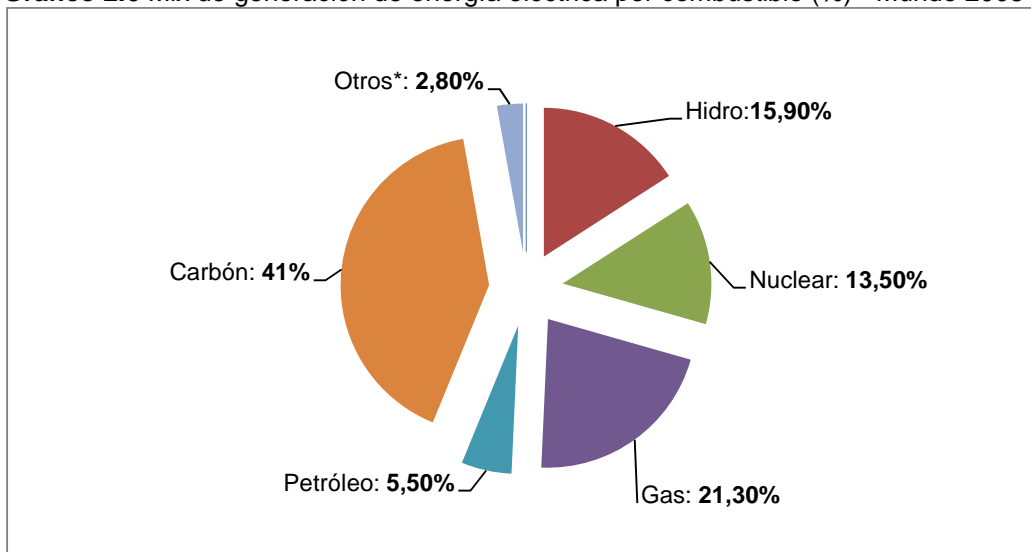
En lo que se refiere a la producción mundial de carbón, se observa que China lidera el *ranking* de mayor productor abarcando casi un 50% de la producción total (2.971 megatoneladas,Mt), seguido de Estados Unidos con 985 Mt; un 15% de la producción anual<sup>23</sup>.

En lo que se refiere a la producción de electricidad, el carbón sigue siendo la fuente de energía con más participación en la matriz eléctrica mundial. En 2008, tal y como se puede comprobar en el Gráfico 2.6, dicho combustible respondía a un 41% de la generación de energía eléctrica, fundamentalmente gracias a las aportaciones de China y Estados Unidos, que lideran el *ranking* de generación de electricidad a través de esta fuente. Es notable el peso del carbón sobre la matriz eléctrica mundial sobre todo porque mantuvo su participación desde los años 70, en detrimento de otros combustibles fósiles como el petróleo, que ha reducido considerablemente su participación<sup>24</sup>.

<sup>23</sup>IEA (2010)

<sup>24</sup>El petróleo pasó de tener un peso sobre la matriz de un 24,7% en 1973 hasta llegar a un 5,5% en 2008. (Fuente: IEA, 2010)

**Gráfico 2.6** Mix de generación de energía eléctrica por combustible (%) - Mundo 2008-



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Internacional de la Energía (OECD/IEA, 2010)

\*Otros incluye energía geotérmica, solar, eólica, combustibles renovables, residuos, etc.

#### 2.2.6.2. El carbón en Brasil

El carbón mineral utilizado en Brasil se divide en dos modalidades: vapor y metalúrgico. El carbón de vapor es aquel que es producido nacionalmente y del que un 90% de su uso se destina a la generación eléctrica. El carbón metalúrgico tiene como característica fundamental el hecho de que se expande cuando la combustión es incompleta, creando un subproducto llamado “coque”, que a su vez es usado en la industria siderúrgica. Este último tipo es integralmente importado.

A título ilustrativo, el uso del carbón (vapor) para la generación de electricidad ha aumentado un 28,3% con relación a 2009. Este uso (generación de electricidad) supone un 1,3% de la matriz eléctrica brasileña. Por otro lado, el consumo (carbón metalúrgico) destinado a la siderurgia también creció un 23,2% con relación al mismo periodo.

El carbón nacional (vapor) representa solamente un 16% de la oferta total de carbón. Su producción, por ejemplo, en 2010 alcanzó 2.161.000 tep (0,9% de la producción total de energía primaria), siendo destinada un 81% de la misma a la generación de electricidad. Por otro lado, un 19% de este tipo de carbón es aplicado en la industria, fundamentalmente en el sector químico y del papel/celulosa.



El carbón (metalúrgico) es usado en su mayoría en la industria (84%), básicamente en la siderurgia. Por otro lado, representa apenas un 5% de la oferta total de energía (2010).

### **2.3. El caso de estudio: La región de Candiota y la minería del carbón**

El objetivo de este apartado es ofrecer un análisis más detallado del caso de estudio, desde el punto de vista del problema en sí, es decir, la minería del carbón en la región de Candiota y sus consecuencias. De esta forma, el objetivo es abordar la actividad en cuestión haciendo hincapié en sus impactos sobre la salud humana, el medioambiente y la economía. En todo caso, se busca familiarizar al lector con la problemática en cuestión, ya que resultará de fundamental importancia a la hora de comprender las distintas alternativas y estimaciones aplicadas en la valoración económica de las externalidades producidas por la central termoeléctrica de Candiota.

#### *2.3.1. La región de Candiota y la generación termoeléctrica a partir del carbón*

El municipio de Candiota está situado al sur de Brasil, en el estado de Rio Grande do Sul, a 420 km de la capital del estado, Porto Alegre, y a 40 km de la frontera con Uruguay (véase Figura 2.1). Dispone de una superficie de 933.843 km<sup>2</sup> y una población residente de 8.771 habitantes<sup>25</sup>.

En el entorno de Candiota existe un gran yacimiento de carbón mineral que abarca una superficie de 2.500 km<sup>2</sup>. Dicho yacimiento supone un 30% de la producción nacional, configurándose como la mina a cielo abierto más grande de Brasil. La minería del carbón existente en la región de Candiota está a cargo de la Companhia Riograndense de Mineração (CRM), cuya producción alcanza aproximadamente unas 100.000 toneladas por mes (t/mes), destinada básicamente al suministro de las termoeléctricas. La mina Seival, con una producción de 50.000 t/mes, suministra básicamente a las cementeras. El carbón extraído en las minas y utilizado en la termoeléctrica de Candiota es del tipo CE-3300<sup>26</sup>. Pires *et ál.* (2001), en un estudio morfológico de la composición del carbón utilizado en la central,

---

<sup>25</sup> Fuente: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Base de datos IBGE Cidades, Censo Demográfico 2010. (Consulta realizada el 03 de Junio de 2011).

<sup>26</sup> Los yacimientos de carbón verificados en Brasil abarcan hasta siete tipos de carbón: CE-3100, CE-3300, CE-4200, CE- 4500, CE-4700, CE-5200 y CE-6000. La calidad de los mismos varía según su poder calorífico. Así, un carbón del tipo CE-3100 tiene 3.100 cal/g (calorías por gramo). Es decir, a más calorías por gramo, más poder calorífico tendrá.

comprobaron que es de baja calidad con alto contenido en cenizas, siendo clasificado por la ASTM<sup>27</sup> como “Bituminoso alto volátil clase C”. Según los ensayos realizados por Pires *et ál.* (2001), el carbón del yacimiento de Candiota tiene un alto contenido en cenizas y una concentración relativamente baja en azufre. En la Tabla 2.1 se resumen las principales características del carbón utilizado en la central de Candiota, determinadas según el estudio desarrollado por Pires *et ál.* (2001). Estas evidencias demuestran el bajo grado<sup>28</sup> del mismo, lo que eleva las pérdidas de materia carbonosa y, consecuentemente, aumentan los impactos sobre la salud humana y el medioambiente. Además, las características morfológicas dificultan su transporte, obligando a que gran parte de las actividades económicas relacionadas con su uso primario se sitúen en las proximidades del yacimiento.

**Tabla 2.1** Características del carbón de Candiota

<b>Criterio</b>	<b>%</b>
Humedad	16,4
Cenizas	49,68
Materia volátil	23,10
Carbono fijo	27,22
Poder calorífico superior (MJ kg <sup>-1</sup> )	14,32
Contenido en azufre	0,96

Fuente: Elaboración propia a partir de Pires *et ál.* (2001)

Las industrias que se hallan próximas a la región y que utilizan el carbón como insumo energético primario son básicamente la generación termoeléctrica y la industria cementera. Las cementeras necesitan elevadas temperaturas para obtener el clínker<sup>29</sup>, que llega a alcanzar entre 1.350 y 1.450°C. Debido a la intensidad energética, este tipo de industria suele instalarse en las zonas con grandes yacimientos de recursos energéticos, como en este caso el carbón mineral. Hecho similar se observa con la producción termoeléctrica, en especial las que utilizan el carbón como insumo energético, cuya ubicación procura reducir los costes de transporte de la materia.

<sup>27</sup>ASTM: American Society for Testing and Materials ([www.astm.org](http://www.astm.org))

<sup>28</sup>El grado del carbón es la cantidad de carbono fijo en el mismo. Mientras más alto sea el grado, menor materia volátil produce. El grado del carbón brasileño varía entre un 32% y un 53%. En el Anexo 3 se pueden encontrar los diferentes tipos de carbón y sus grados.

<sup>29</sup>El clínkeres la principal materia prima para la producción de cemento.

**Figura 2.1** Localización del municipio de Candiota



Fuente: Elaboración propia a partir de Google maps y del Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - IBGE Cidades-. (Consulta realizada el 03 de junio de 2011).

Es precisamente en esa región donde se encuentra instalado el complejo termoeléctrico “Candiota”<sup>30</sup>, que actualmente posee una capacidad de generación de 446MW (Fases A y B). En marzo de 2011 entró en operación la Fase C, que añade 350MW a la capacidad existente, llevando así a la central a su configuración actual: 796MW. No obstante, es conveniente resaltar que la estimación de los impactos planteados en este estudio se restringe únicamente a las Fases A y B (446 MW).

La historia del complejo se inicia en los años 50, cuando se realizan los primeros estudios prospectivos sobre aprovechamiento térmico del carbón. En 1961, se inaugura la primera central del complejo, la central Candiota I. Trece años después, en 1974, se inaugura la Usina Termoeléctrica Presidente Médici – UTPM- o “Candiota II”, con dos unidades de 63 MW. A partir de la década de los 70, tras el llamado “Milagro Económico Brasileño”<sup>31</sup>, se incrementa la demanda energética y grandes emprendimientos energéticos afloran por todo el país. En ese contexto surge, a finales de 1986, la Fase B de Candiota II con dos unidades de 160 MW.

<sup>30</sup>El complejo termoeléctrico engloba las usinas Presidente Médici A/B (Candiota, en adelante) con capacidad de generación de 446 MW. Tras la implantación de la Fase C dicha capacidad se amplió a 796MW.

<sup>31</sup>El periodo del “Milagro Económico” es una fase curiosa en la historia del país. Entre 1968 y 1973 la economía vivió un periodo de auge. El poder adquisitivo de la clase media aumentó de forma considerable. El gasto público se vio incrementado, grandes emprendimientos se pusieron en marcha y el país dio un gran paso hacia su industrialización.

**Figura 2.2** La central termoeléctrica Presidente Médici - "Candiota"-



Fuente: CGTEE. <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>  
(Consulta realizada el 08 de junio de 2011)

### 2.3.2. *Los impactos al medioambiente y a la salud humana*

Pese al gran valor económico que aporta, el aprovechamiento termoeléctrico del carbón supone grandes impactos al medioambiente. Dichos impactos medioambientales han sido objeto de análisis en varios estudios técnicos y académicos. Los mismos señalan que la falta de planificación de la actividad, el uso de técnicas industriales obsoletas (tecnologías de combustión del carbón) y la mala calidad del carbón producen serios impactos al medioambiente. Los análisis científicos del agua, del aire y del suelo han demostrado niveles elevados de contaminación, cuyo principal agravante es la baja calidad del carbón encontrado en la zona, que tiene un alto contenido de azufre y cenizas.

Martins & Zanella (1988) han detectado que la actividad minera estaba generando afecciones en los ríos, arroyos y suelos de la región. El estudio consideró también la percepción de la población en cuanto al deterioro de la calidad ambiental de la región. La contaminación del agua se reducía básicamente a la concentración de metales pesados y a la acidificación de los ríos y arroyos.

Otros estudios, como el desarrollado por Oliveira *et ál.* (1982), identificaron que la contaminación provocada por la actividad causaba el desgaste dentario de los animales bovinos, a causa de la ingestión de flúor y silicio encontrado en los efluentes de la central termoeléctrica, generando pérdidas económicas considerables para los ganaderos de la zona.

Andrade (1985) descubrió que las cenizas liberadas por la combustión contenían un pH ácido que a su vez causaba importantes impactos en las infraestructuras metálicas de la zona. También encontró dichos elementos en las aguas subterráneas y superficiales de la región. Fiedler & Solari (1988) también concluyeron que la calidad de las aguas superficiales próximas a Candiota presentaba niveles de acidez elevados, así como concentraciones de metales pesados (hierro, manganeso, zinc, cobalto y plomo) por encima de los niveles establecidos por el CONAMA<sup>32</sup>.

Denardin (1997) señala que los impactos ambientales resultantes del aprovechamiento del carbón pueden ocurrir a lo largo de tres fases. En la mina, en el transporte y en su utilización/transformación. Este autor pone énfasis en los impactos causados por vertidos de azufre y hierro en los ríos. Otro problema citado es la mala gestión de los residuos. La explotación de la mina se realiza todavía a cielo abierto, esparciendo cenizas sobre la vegetación, edificios y carreteras.

En síntesis, todos estos estudios ponen de manifiesto las siguientes afecciones al medioambiente a causa de la combustión del carbón y explotación de la mina:

- Acidificación (pH 2,0) de las aguas próximas a la central causada por el vertido de efluentes.
- Daños causados a los suelos, provocando pérdidas económicas en la agricultura.
- Daños causados en los rebaños. Tal hecho ha provocado la reducción de los mismos.
- Daños en los pastizales de la región.
- Daños en los cultivos de patatas, hortalizas y producción de miel.

Además, a partir de la década de los 90, una serie de Organizaciones No Gubernamentales (ONG, en adelante) y actores políticos denunciaron que la contaminación atmosférica generada en la región de Candiota era la causante de la lluvia ácida en Uruguay. Durante tal periodo, se establecieron puntos de diálogo entre representantes de ambos países, pero al parecer nunca se llegó a un acuerdo ni tampoco se han encontrado estudios contundentes que vincularan la existencia de lluvia ácida con la contaminación generada en Candiota.

---

<sup>32</sup>CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

Tal como se ha dicho en el apartado anterior, el uso del carbón como recurso energético es uno de los pilares de la economía local y, como consecuencia, supone una gran fuente de empleo. Por otro lado, un 40% de la población afirma que “la parte negativa” de la actividad es la contaminación que genera, sobre todo del aire y del agua.

*Según relatos de los vecinos, ciertos días, hay que cerrar todos los puntos de entrada de aire de la vivienda con el objetivo de evitar que el polvo proveniente de la minería y de la central entre en el domicilio. (Entrevista recogida en el trabajo de Fritz et ál., 2003).*

A pesar de que los agentes económicos responsables de la explotación del recurso imponen a la sociedad un coste externo en forma de daño a la salud, un 34% de la población no ve la contaminación como algo incómodo y anteponen la conservación de los puestos de trabajo a las cuestiones relativas a la salud.

*Ha sido posible detectar a lo largo de las entrevistas que la mayoría de la comunidad percibe las actividades de minería, la central y las cementeras como una garantía de puestos de trabajo y seguridad de sueldos. De esta manera, cualquier incomodidad generada por esas actividades no es vista como un problema debido a un bien mayor: el trabajo (Fritz, et ál., 2003).*

Un dato relevante, recogido en el trabajo de Fritz et ál. (2003), es que un 10% de los entrevistados reconocieron tener problemas respiratorios. Este hecho se comprueba con los informes divulgados por los órganos de salud del municipio, donde se considera el impacto como “considerable”. La Tabla 2.2 presenta los resultados de las encuestas relacionadas con los problemas de salud que podrían padecer los habitantes de Candiota. Nótese que aproximadamente un 19% de los entrevistados afirman padecer de enfermedades respiratorias y circulatorias que, a su vez, son causas que podrían estar asociadas con la contaminación atmosférica.

*La Secretaria de salud del municipio reveló tener preocupaciones con los índices de la población local afectada por problemas respiratorios (Fritz et ál., 2003).*

**Tabla 2.2** Principales problemas de salud de los habitantes de Candiota (% entrevistados)

<b>Fuentes de Ingreso</b>	<b>%</b>
Ninguno, no declarado	57
Respiratorios	10
Circulatorios	9
Neurológicos	2
Reumáticos	15
Dermatológicos	0
Digestivos	5
Otros	2
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: Fritz *et ál.* (2003)

## **Capítulo 3 : Valoración de las externalidades de la energía: antecedentes**



### 3.1. Conceptualización inicial

El debate en torno al cambio climático, sus efectos y causas es uno de los temas de gran discusión y controversia en el ámbito científico. No cabe la menor duda de que en cualquier esfera de actuación, principalmente empresarial y política, los aspectos del desarrollo sostenible marcan la agenda. La creciente concienciación de la sociedad en cuanto a los aspectos medioambientales no deja de ser un hecho plausible pero, ¿sabemos realmente qué es el desarrollo sostenible y qué modelos queremos construir? Es justamente en este clima de desencuentros, prácticas difusas, incoherencias e irrationalidades donde abogamos por la preponderancia de la investigación científica como medio racional de análisis de esta problemática, abriendo el abanico de posibles alternativas para su mitigación.

Desde la perspectiva de la economía ambiental pretendemos abordar la problemática del desarrollo sostenible, teniendo en cuenta los múltiples factores socioeconómicos y medioambientales existentes. Desde luego que la tarea no resulta fácil o, más bien, podríamos decir que el debate en cuanto a su viabilidad genera aún gran controversia. Sin embargo, desde la economía, junto con otras disciplinas, se pueden plantear interesantes vías de análisis de los principales problemas ambientales contemporáneos.

Si nos remitimos a las preguntas planteadas al principio del capítulo anterior, observaremos que la economía es la disciplina por la cual se trataría de dar respuesta al cómo y por qué se producen las decisiones de los determinados agentes. Para ello, el economista dispone de una serie de herramientas cuyo objetivo final será equilibrar distintas alternativas que, dentro de un ambiente de recursos escasos, podrían resultar incompatibles. En este sentido, la economía ambiental es la aplicación de las herramientas del análisis económico al estudio de los problemas ambientales y de los efectos de las decisiones adoptadas por los agentes sobre el medioambiente.

Field & Field (2003) afirma que la economía ambiental es una materia analítica, puesto que no solo procura describir los problemas ambientales sino que también intenta ofrecer una explicación para los mismos y, evidentemente, las soluciones que se podrían acometer. En este sentido, el análisis de los problemas medioambientales, sus causantes y efectos son temas de gran relevancia dentro de la economía ambiental.

### 3.2. El mercado, bienes públicos y externalidades

La sociedad se estructura con el objetivo de solucionar sus más diversos problemas, teniendo en cuenta que parte de ellos tienen un trasfondo económico. Básicamente, los problemas de esta naturaleza se circunscriben al ámbito de la satisfacción de las necesidades, desde las más sencillas hasta las más complejas. Obviamente, un individuo o nación, en el proceso de satisfacción de sus necesidades, requerirán una determinada cantidad de recursos como, por ejemplo, los naturales. Valga lo anterior para comprender el papel que juega la economía en este proceso, que es la organización de estos recursos con el objetivo de obtener el máximo bienestar y en función de la satisfacción de las necesidades. La solución de este problema es, por lo tanto, uno de los objetivos de la economía y el mercado resulta ser en este sentido el sistema dedicado a tal efecto.

En un sistema de mercado los individuos revelan sus preferencias en relación con un bien o servicio a través del precio, que es el valor de un bien en el mercado. Podríamos pensar, lógicamente, que el sistema de voto unitario sería un buen sistema por el cual un individuo asignaría un voto a aquella medida que más le agrade o más se ajuste a sus preferencias. Este es el caso del sistema político democrático, pero en el ambiente de mercado esa metodología se tornaría impracticable por la sencilla razón de que no expresa la intensidad de una preferencia. Es así, por lo tanto, guardadas las debidas proporciones, que el precio como instrumento de asignación interactúa en el mercado como la mejor opción disponible en un ambiente de recursos escasos.

Es a partir del concepto de precio mencionado en el párrafo anterior, que queremos introducir el debate acerca de los problemas ambientales. No obstante, para entender esta relación, resulta fundamental comprender la función de la biosfera y su innegable importancia. Por un lado, la biosfera es la raíz fundamental de la vida en sus más complejas dimensiones. Por otro, la biosfera es la fuente de recursos para la producción de bienes y servicios. En este caso funciona no solo como *input* para la producción de un bien o servicio (ej. mineral para la fabricación de acero) sino que también influye de forma indirecta en la producción. Por ejemplo, elevados niveles de contaminación pueden afectar a la calidad de una cosecha agrícola. Además, una tercera función de la biosfera es su capacidad relativa de asimilación de residuos generados por la actividad antropogénica. Por último, la biosfera forma parte de la función de producción de utilidad de las personas. La salud es un claro ejemplo de

esta función de producción individual y, por ende, si la calidad del aire es mala, dicha función se verá obviamente afectada.

Habida cuenta de las funciones que asume la biosfera, observamos cómo el mercado es incapaz de asignar un precio para las mismas. Azqueta (2007) resalta que la ausencia de precio no es la única causante de los problemas medioambientales, sino que resulta ser una de las causas más importantes. Si nos remitimos al ejemplo de la salud mencionado en el párrafo anterior, la ausencia de precio para el bien en cuestión (calidad del aire) hace que un determinado agente (productor de electricidad), al utilizar las funciones de la biosfera (emisiones de contaminantes), no tenga en cuenta la pérdida de bienestar de la persona afectada, puesto que no tiene que pagar por ella. Cuando ocurre este comportamiento decimos que el productor de electricidad genera una externalidad a las personas que sufren con la contaminación y, por ende, ven su función de producción reducida sin que hayan elegido ese cambio o hayan recibido una compensación. Hay que señalar que incluso cuando se produce dicha compensación (internalización) los daños pueden seguir ocurriendo.

Una externalidad se produce cuando un agente económico impone costes o beneficios a otros, cambiando así sus funciones de producción. Conviene resaltar en este sentido que, pese a que el término más recurrente sea la externalidad negativa, esta puede tener también un efecto positivo. En el caso de la energía, los impactos medioambientales asociados con su ciclo de vida (ej. contaminación atmosférica, eutrofización de los ríos, etc.) no forman parte de las funciones de producción de algunas fuentes. Por ende, el precio informado al mercado no internaliza las externalidades y redundante en un indicador erróneo con respecto a la realidad. Linares (2002) resalta que mientras más elevadas sean las externalidades, más bajo será el precio de la energía y más elevados serán su consumo e impacto ambiental en comparación con el supuesto de una asignación eficiente.

Ahora bien, conviene señalar que este comportamiento de los agentes se da muchas veces en contextos de bienes públicos como es el caso de la calidad del aire en el ejemplo anterior. La diferencia entre un bien público y otro privado reside en dos aspectos fundamentales que asumen los primeros: propiedad de no exclusión y la no rivalidad en el consumo. La propiedad de no exclusión quiere decir que si un bien es ofrecido a una persona, dicha oferta es extensiva a todos los demás. Imaginemos en este sentido el caso del productor de electricidad; si el Estado decide, por ejemplo, tomar medidas para reducir la contaminación del aire (ej. obligar a la central a instalar

filtros), no podrá impedir que esta calidad del aire sea ofrecida a todos los demás. La segunda propiedad de un bien público es la no rivalidad en el consumo. El corolario de esta propiedad es que el consumo de un bien no impide que otra persona lo haga en los mismos términos. Si ponemos el ejemplo de un paisaje natural, el hecho de que un individuo disfrute del mismo no impide que otro individuo también goce de este momento. De esta forma, ante estas situaciones, no se puede pagar para que se garantice el acceso a un determinado bien público y el agente sabe que si lo hace no podrá impedir que los demás agentes disfruten del mismo.

Podría parecer que la solución al problema de la ausencia de precio reside en el hecho de que dichos bienes no disponen de un “propietario”. La temática relacionada con la asignación de derechos de propiedad como solución a los problemas ambientales ha sido objeto de mucho debate a lo largo de los años. Uno de los primeros en abordar dicha cuestión fue el economista británico Robert Coase, ganador del Premio Nobel de Economía en 1991 y conocido sobre todo por el llamado “teorema de Coase”<sup>33</sup>. Esta formulación sugiere que la ausencia de unos derechos de propiedad sería la raíz del problema de la falta de mercado para determinados bienes<sup>34</sup>. El punto de partida del teorema es que para que existiera una externalidad siempre tendría que haber dos partes envueltas en una negociación (el causador y la parte afectada). De esta forma, el problema causado por las externalidades se vería resuelto asignando la propiedad a una de las personas en esta negociación, dejando bajo la potestad de la misma la decisión de qué se puede hacer con el recurso. Sin embargo, esta asunción encierra unos cuantos problemas. En primer lugar, una supuesta privatización del recurso traería problemas por el hecho de que quien lo detentara no podría utilizar todos los beneficios asociados, puesto que existiría una clara diferencia entre el valor privado y el valor social del bien. Por ejemplo, pongamos el caso de un río; el propietario que detenta la propiedad del mismo, a la hora de comercializar un determinado permiso de contaminación, valoraría el bien según el valor que dicho recurso tiene para él mismo, pero el río tiene un indudable valor para otras personas y además un valor social que se vería mermado en el caso de que se perdiera. La segunda cuestión tiene un origen temporal. Aunque el propietario del río

---

<sup>33</sup>En realidad, el teorema no ha sido formulado por Coase como tal, al mismo tiempo que no sería coherente concluir que Coase estaba a favor de la privatización de los recursos naturales como solución al problema planteado.

<sup>34</sup>Otra forma de abordar el problema de las externalidades ha sido discutida en el trabajo de Pigou. Este autor recomendó el tratamiento de las externalidades y, por ende, su internalización mediante la imposición de impuestos y tasas al agente que generase dichas externalidades. Era justamente de este planteamiento del que Coase disenta al argumentar que dicho recurso no sería necesario, bastando solamente para solucionar este problema asignar derechos de propiedad para una futura negociación entre los agentes.

del ejemplo anterior pudiese hacerse con todos los beneficios<sup>35</sup>, este trataría de explotarlo durante su vida, pero el río dispone de un valor e importancia que superarían la expectativa de vida del propietario (beneficios para las generaciones futuras). El tercer problema redunda del hecho de que no solo haría falta la inexistencia de externalidades, sino también un equilibrio de los mercados (y por ende de los precios), algo que resultaría muy difícil de obtener. El último punto tiene que ver con el hecho de que la aplicación del teorema de Coase implicaría que la explotación del recurso sería la misma cualquiera que fuera la persona que lo detentara, hecho que difícilmente ocurriría dado que la rentabilidad de ambas opciones dependería del propietario del recurso<sup>36</sup>.

Ante un contexto energético donde se observen externalidades, la consecuencia más inmediata podría ser que la elección de la tecnología a ser empleada también se vería condicionada. Si una determinada fuente de energía, pongamos por ejemplo una térmica a carbón sin controles de emisión, no internaliza las externalidades redundantes de su ciclo de vida<sup>37</sup> esto supondría que su precio sería inferior, por ejemplo, a otra central que incorpore un sistema de combustión más eficiente bajo el punto de vista ambiental.

En el caso de la energía, la asignación viene dada por el precio asociado a cada una de las fuentes con el único objetivo de asignar este recurso de una forma eficiente. La respuesta a esta pregunta es que el precio, en este caso el de la energía, no recoge dichos impactos en forma de costes en su función de producción o consumo (Linares, 2002).

En el caso de los recursos naturales, este hecho demuestra que el funcionamiento del mercado dista de ser un modelo ideal. Cuando el precio de la energía no es capaz de ofrecer una señal adecuada acerca de su valor, podemos estar ante un contexto en el cual los impactos vinculados con su producción no aparecen en la estructura de costes. Uno de los motivos por los cuales un agente económico no internaliza dichos impactos sería el sistema de incentivos disponibles en una economía de mercado. Field & Field (2003) señala que “los incentivos son de vital importancia para reducir la contaminación industrial” y por eso el incentivo vinculado

---

<sup>35</sup>En este caso no habrían externalidades.

<sup>36</sup>Si pensamos en el caso del río, no habría razones para suponer que la explotación utilitarista del mismo (ej. vertido de contaminantes) fuera igual a la disposición a pagar que tendría un determinado individuo para conservarlo.

<sup>37</sup>Ciclo de vida también puede ser denominado cadena del combustible.

con la maximización de los beneficios conlleva que se aproveche cualquier factor disponible en el mercado. El problema es que, en ocasiones, el agente utiliza el medioambiente para verter los residuos que genera, puesto que aparentemente lo considera como un recurso “gratuito”. La asunción de la biosfera como un recurso de “libre acceso” tiene origen en sus propias características, es decir, es considerada un bien público.

De esta forma, parte de los problemas ambientales tienen su origen en un fallo del mercado. Los agentes, a la hora de actuar en el ambiente de mercado, generan un impacto ambiental cuyo grado puede variar en función de la conducta adoptada y de la forma que se empleó para resolver los problemas de asignación de recursos. En este sentido, la solución al problema energético de un país puede respaldarse, por ejemplo, con la promoción de fuentes de energía renovables y, con ello, generar un impacto relativamente menor que el de las fuentes fósiles. Aunque esta cuestión parezca sencilla, su solución plantea una serie de problemas. En ello intervienen multitud de variables, como el precio de la energía renovable, su carácter estable, la necesidad de inversiones a gran escala, las preferencias de los agentes, etc. De este modo, el análisis económico y su aportación a la solución de los principales problemas ambientales no tiene un camino lineal a la hora de plantear las soluciones adecuadas. Más bien estaríamos hablando de un camino tortuoso, donde las principales variables de mercado y sociales jugarán un papel fundamental.

### **3.3. Las externalidades de la energía**

Es relevante resaltar que cualquier fuente de energía siempre traerá aparejado un impacto medioambiental o social, tanto bajo el punto de vista de la demanda como también de la oferta. No obstante, el monto de las externalidades variará en función de la tecnología y combustibles empleados. Partiendo de ese supuesto, una adecuada valoración de una fuente de energía debe contemplar no solo los beneficios, sino también los costes asociados con su ciclo de vida. Como hemos señalado, el problema fundamental reside en el hecho de que, en contextos de bienes públicos, no siempre existe un mercado para los beneficios ambientales (por ejemplo de una fuente de energía renovable) o bien resulta tarea difícil valorar las externalidades negativas vinculadas a una fuente de energía altamente contaminante. A modo ilustrativo, se presenta en la Tabla 3.1 la descripción de los posibles impactos que podrían causar las principales fuentes de energía durante el proceso de generación de energía eléctrica.

**Tabla 3.1** Principales impactos cuantificados durante la generación de energía, según el tipo de fuente

Tipo de fuente	Impactos asociados (fase de generación)
Carbón y lignito	<b>Emisiones atmosféricas:</b> partículas (PM), SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , metales pesados. <b>Vertidos líquidos:</b> productos químicos, contaminación térmica. <b>Residuos sólidos:</b> escorias y cenizas.
Petróleo	<b>Emisiones atmosféricas:</b> SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> <b>Vertidos líquidos:</b> productos químicos, contaminación térmica.
Gas natural	<b>Emisiones atmosféricas:</b> CO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> <b>Vertidos líquidos:</b> productos químicos, contaminación térmica.
Nuclear	<b>Emisiones atmosféricas:</b> radiactividad. <b>Vertidos líquidos:</b> productos químicos, contaminación térmica. <b>Residuos sólidos:</b> materiales contaminados y combustible gastado. <b>Accidentes nucleares</b> <b>Salud mental</b>
Hidráulica	Alteración de la hidrología, perturbación de hábitats, accidentes, alteración de microclima.
Solar	<b>Residuos sólidos:</b> metales pesados integrantes de los componentes.
Eólica	Perturbación de hábitats, ruido.
Biomasa	<b>Emisiones atmosféricas:</b> NO <sub>x</sub> , partículas. <b>Vertidos líquidos:</b> productos químicos, contaminación térmica. <b>Residuos sólidos:</b> escorias y cenizas.

Fuente: Linares (2002)

No obstante, es interesante tener una visión tridimensional de los impactos mencionados en la Tabla 3.1, es decir, del trasfondo que pueden tener muchos de ellos: las externalidades. En este sentido, las emisiones atmosféricas conllevan una serie de externalidades que van desde daños para la salud humana hasta cuestiones asociadas con el cambio climático. Por otro lado, los residuos sólidos degradan el medioambiente y el hábitat de algunas especies. El proyecto ExternE de la Unión Europea (European Comission, 2005) clasifica los impactos asociados con la producción de energía en tres categorías: impactos ambientales, cambio climático y accidentes. En términos de impactos ambientales, nos referimos a la liberación de sustancias (partículas) y energía (ruido, radiación, calor) en el medio. Los impactos vinculados con el cambio global tienen que ver con la emisión de gases de efecto invernadero. Por último, los accidentes abarcan aquellos eventos asociados con la operación, construcción o desmantelamiento de la actividad. Se refieren básicamente a eventos que produzcan la muerte de seres humanos, morbilidad, traumas mentales, contaminación de tierras o de alimentos.

Ahora bien, no conviene perder de vista que cada tipo de impacto conlleva una diferente composición de las externalidades. Esta matización resulta relevante puesto que, tal y como hemos mencionado en el apartado anterior, para que exista una externalidad tiene que haber un agente que la genere y otro que la reciba (afectado), sin que haya sido compensado por ello. En términos de los impactos ambientales, la clasificación de las externalidades dependerá del medio afectado: agua, suelos y aire. Cuando hablamos de los impactos sobre los acuíferos, básicamente nos referimos a los vertidos líquidos que un determinado emplazamiento puede generar. Muchas centrales térmicas de generación necesitan un flujo constante de agua, especialmente para la refrigeración de sus componentes. Los impactos asociados con dichos efluentes pueden ser térmicos o químicos. Tras los procesos de refrigeración, el agua es devuelta al río pero a una temperatura diferente a la que había sido tomada previamente, pudiendo aumentar la temperatura del medio y generar un impacto sobre el equilibrio del ecosistema. Los efluentes químicos son aquellos que, tras pasar por el proceso de refrigeración, traen consigo elementos y residuos resultantes de la operación de la central y que a su vez causan un impacto sobre el medio acuático. En el caso de la hidráulica, el agua es un requisito fundamental y los impactos ambientales se producen principalmente en la fase de construcción de la presa. Dichos efectos pueden causar impactos sobre el cauce del río, esteros e incluso en los deltas. Por otro lado, la inundación del terreno para formar el embalse puede causar impactos sobre el suelo, vegetación, pesca, fauna y hasta incluso en el microclima. Las externalidades que redundan de dichos impactos pueden ir desde la pérdida de biodiversidad hasta el desplazamiento de poblaciones que dependen del río para ganarse la vida. Hay que sumar también las emisiones de CO<sub>2</sub> a causa de la degradación de la materia orgánica depositada en el fondo de los embalses. La relación de los impactos que puede producir una térmica o una hidroeléctrica es casi infinita, aquí hemos enumerado solo algunos de los más visibles.

El principal impacto sobre los suelos tiene que ver con las pérdidas agrícolas y la inhabilitación de las tierras para su uso productivo. La contaminación de los suelos puede ocurrir a partir de determinados vertidos líquidos y sólidos o a partir de la deposición de contaminantes previamente emitidos a la atmósfera. Los dos primeros son relativamente fáciles de identificar y reducir mediante medidas de control. En lo que se refiere a aquellos producidos por la deposición de contaminantes, los principales daños son causados por el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). El SO<sub>2</sub> tiene la característica de diluirse en el agua atmosférica y de llegar a la superficie a través de las precipitaciones, más conocidas como lluvia ácida. Cuando hay una gran



deposición ácida<sup>38</sup> los impactos sobre el terreno son elevados y se producen pérdidas agrícolas. Cabe mencionar que a bajas concentraciones el SO<sub>2</sub> puede incluso elevar la productividad agrícola. Por otro lado, altas concentraciones de ozono producen pérdidas de cultivos.

Los impactos sobre la atmósfera son quizás aquellos que más atención reciben cuando se trata de emisiones producidas por centrales de generación. Los principales contaminantes emitidos son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), las partículas (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10-2,5</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) y el monóxido de carbono (CO). Las PM son las partículas microscópicas sólidas o líquidas que se encuentran suspendas en el aire, cuyo tamaño puede variar, según la clasificación tradicional, entre aquellas con menos de 2,5 micras (finas; PM<sub>2,5</sub>) o bien las coarse con tamaño comprendido entre 10-2,5 micras. La clasificación en PM<sub>10</sub> abarca las finas y coarse (tamaño inferior a 10 micras). En el capítulo cuatro, explicaremos con más detalle las características de las partículas. Las emisiones de contaminantes producen a su vez impactos sobre infraestructuras, sobre el cambio climático y la salud humana. Los daños sobre infraestructuras básicamente ocurren a partir del SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> (óxido nítrico), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y de la deposición ácida de contaminantes secundarios como los sulfatos. Los principales daños ocurren por la oxidación de infraestructuras (edificios, estructuras metálicas, etc.).

Los impactos relacionados con el cambio climático y el calentamiento global son aquellos asociados con las consecuencias del efecto invernadero. Las principales consecuencias del efecto invernadero son un eventual aumento del nivel del mar a causa del deshielo del agua continental, un cambio en el régimen de precipitaciones, destrucción de glaciares, alteraciones en la producción agrícola, enfermedades causadas por vectores, condiciones climáticas extremas, entre otros impactos. Las externalidades que advienen de dichos impactos son más bien obvias y por lo general son estimadas según el coste asociado con las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otra vía de impacto producida por la contaminación atmosférica es la salud humana. Los impactos sobre la salud se dan básicamente debido a la exposición de partículas (finas; PM<sub>2,5</sub> y coarse; PM<sub>10-2,5</sub>), dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno,

---

<sup>38</sup>Conviene resaltar que pequeñas cantidades de SO<sub>2</sub> pueden tener un efecto fertilizador, pero a partir de dicho límite empiezan a producir daños al suelo. Además, pueden darse deposiciones secas aunque la gran mayoría de los impactos provienen de las precipitaciones.

ozono, compuestos orgánicos volátiles<sup>39</sup> (VOC por sus siglas en inglés), hidrocarburos aromáticos policíclicos<sup>40</sup> (PAH por sus siglas en inglés) y metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, níquel, mercurio y plomo). Además, existen contaminantes secundarios<sup>41</sup> que también producen afecciones sobre la salud. En la Tabla 3.2 presentamos de forma resumida los impactos que cada uno de los contaminantes pueden generar sobre la salud humana.

**Tabla 3.2** Contaminantes y sus efectos sobre la salud

Contaminante primario	Contaminante secundario	Impacto
Partículas (PM <sub>2,5</sub> , PM <sub>10-2,5</sub> etc.)	n/a	Mortalidad Morbilidad: Afecciones cardiopulmonares
SO <sub>2</sub>	Sulfatos	Mortalidad Morbilidad: Afecciones cardiopulmonares
NO <sub>x</sub>	Nitratos	Mortalidad Morbilidad: Afecciones cardiopulmonares
NO <sub>x</sub> + VOC	Ozono	Mortalidad Morbilidad: Días de actividad restringidos, asma, síntomas leves.
CO	n/a	Mortalidad: Insuficiencia cardiaca congestiva Morbilidad: Afecciones cardiopulmonares
PAH	n/a	Cánceres
As, Cd, Cr, Ni	n/a	Cánceres Otros aspectos de la morbilidad
Hg, Pb	n/a	Morbilidad (neurotóxica)

Fuente: Elaboración propia a partir del proyecto ExternE (European Comission, 2005)

<sup>39</sup> Son los hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a esta temperatura. Los VOC más comunes son: metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno. Pueden tener un origen natural o artificial. (Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente. Gobierno de España. [http://www.marm.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos\\_organicos\\_volatiles.aspx](http://www.marm.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx) (consulta realizada el 13 de febrero de 2012).

<sup>40</sup> Son compuestos orgánicos que se forman tras procesos naturales como la combustión incompleta de madera, carbón, o a través de actividades industriales como la fabricación de aluminio, acero, hierro, etc. Además, son generados tras la incineración de residuos, minería y refinado de petróleo. Fuente: Health Protection Agency. United Kingdom. <http://www.hpa.org.uk/Topics/ChemicalsAndPoisons/CompendiumOfChemicalHazards/PolycyclicAromaticHydrocarbons/> (consulta realizada el 13 de febrero de 2012).

<sup>41</sup> Son aquellos que se forman tras la combinación de contaminantes primarios con otros elementos presentes en la atmósfera. Los sulfatos y nitratos son un claro ejemplo; son elementos que se forman a partir del SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>

### 3.4. Estado de la cuestión: Estudios relacionados con la valoración económica de externalidades de la energía

A finales de los años 80 del siglo pasado, se produjo el desarrollo de métodos y técnicas para valorar los impactos negativos producidos por la generación de energía eléctrica. El despliegue doctrinario en materia de desarrollo sostenible pone de manifiesto la estrecha relación entre problemas socio-ambientales y la generación de energía eléctrica. No de forma aleatoria, gran parte de los estudios sitúan el consumo y la producción de energía como responsables de más de un 60%<sup>42</sup> de las emisiones de GEI. En este sentido, Kim (2007) subraya la existencia de dos grandes fuentes teóricas dedicadas a la evaluación de los impactos medioambientales y sociales provenientes de la generación de energía eléctrica: la neoclásica y la economía institucional. La primera plantea los problemas ambientales como un fallo de mercado y adopta la valoración económica de las externalidades como un instrumento relevante a la hora de evaluar los costes no deseados producidos por la generación de energía. El otro enfoque, la economía institucional, rehúsa el planteamiento de mercado como único causante de los problemas medioambientales. Para ello, se argumenta que no solamente el fallo del mercado es el responsable de la amplitud de los problemas ambientales, sino que también hay un fallo institucional. Para la instrumentalización del enfoque institucional, se utiliza la “Valoración del Coste Social” como método cuantitativo y la “Toma de Decisiones Multicriterio”, como cualitativo.

El planteamiento de los problemas ambientales como un fallo del mercado ha sido ampliamente discutido en la teoría económica. La valoración económica de las externalidades conlleva dos posibles aproximaciones básicas: *Bottom-up* y *Top-down*. El *Bottom-up* consiste en evaluar los distintos impactos (emisiones, vertidos, etc.) generados por una determinada central o fuente contaminante. Para ello, se hace uso de modelos de dispersión y de las llamadas “Funciones Concentración-Respuesta” para estimar el daño marginal a causa, por ejemplo, de las emisiones atmosféricas. Así, una vez conocido el daño marginal (ej. casos por año por persona) se multiplica por el coste unitario (ej. dólares por caso) asociado con la función del daño (Kim, 2007). El enfoque *Top-down* encuadra una postura analítica y genérica del daño ambiental/social. Es decir, se estima el impacto bajo una perspectiva nacional teniendo en cuenta diferentes vías de impacto (impactos a las aguas fluviales, etc.).

---

<sup>42</sup>IEA (2008)

Los estudios relacionados con la valoración económica de las externalidades de la energía han ganado importancia en los medios académicos y han servido de elemento fundamental para la planificación energética. De esta manera, se ha presenciado el desarrollo de grandes proyectos y estudios cuyos resultados arrojan un buen compendio de datos y, asimismo, han culminado con la creación de modelos robustos. Cabe destacar los resultados en el marco del proyecto ExternE de la Comisión Europea (European Comission, 2005).

Spadaro (1999) hace una recopilación exhaustiva de los estudios asociados con las externalidades causadas por la generación de electricidad (externalidades de la energía), que tuvieron lugar desde 1988 hasta 1999. Kim (2007) destaca los trabajos realizados por RCG/Tellus (1995) y el Proyecto ExternE de la Unión Europea (European Comission, 2005). En ambos estudios, se han desarrollado modelos informáticos dedicados a tal efecto. RCG/Tellus culminó con la elaboración del modelo EXMOD y el proyecto ExternE con la del modelo EcoSense. Como se ha podido comprobar, el cuerpo teórico asociado con las externalidades de la energía ha sido ampliamente estudiado por la literatura. Las principales aportaciones académicas sobre la materia se resumen en la Tabla 3.3 donde se puede observar el enfoque adoptado y el objeto de los mismos.

**Tabla 3.3** Relación de los estudios/modelos sobre las externalidades de la energía

<b>Estudios/modelos</b>	<b>Enfoque/Metodología</b>	<b>Características</b>
Hohmeyer (1988)	<i>Top-down</i>	<b>País: Alemania</b> Considerado el primer estudio de relevancia. Nuclear, solar, eólica, carbón y petróleo.
Ottinger <i>et ál.</i> (1991) o Pace University Study	<i>Top-Down</i> Los datos utilizados partieron de estudios previos.	<b>País: EEUU</b> Nuclear, carbón, petróleo, gas, hidráulica, solar, eólica, generación a partir de residuos. Impactos sobre la salud, cultivos, bosques, caladeros, infraestructuras, impacto visual y accidentes nucleares.

Pearce <i>et ál.</i> (1992, 1995)	<i>Top-down</i> Utiliza los valores de otros estudios para estimar los daños.	<b>Países: EEUU y Reino Unido</b> Estudia los impactos relacionados con diferentes ciclos de vida del combustible y tecnologías.. Impactos sobre la salud, cultivos, bosques, biodiversidad, infraestructuras, impacto visual y accidentes nucleares.
Friedrich & Voss (1993)	<i>Top-down</i>	<b>País: Alemania</b> Nuclear, carbón, eólica, fotovoltaica. Impactos sobre bosques, cultivos, fauna, infraestructuras, salud, accidentes nucleares.
Ball <i>et ál.</i> (1994)	<i>Top-down</i>	<b>País: Reino Unido</b> Nuclear, carbón, petróleo, gas, eólica, marea. Impacto sobre la salud y cambio global. No ofrece una valoración monetaria.
Ontario Hydro (1993)	<i>Bottom-up</i> Enfoque basado en la Metodología de las Vías de Impacto	<b>País: Canadá</b> Nuclear, carbón, ciclo de vida de combustible fósiles.
ORNL/RFF (1994, 1994a)	<i>Bottom-up</i>	<b>País: EEUU</b> Nuclear, petróleo, gas, carbón, hidráulica, biomasa e incineración.
ExternE – 1995 (European Commission, 2005)	<i>Bottom-up</i> Aplica la llamada “Metodología de las Vías de Impacto”	<b>Países de la Unión Europea</b> Evaluación de distintas tecnologías. Impactos sobre la salud, cambio global. Desarrollo del modelo Ecosense. Metodología de las Vías de Impacto
Rowe (1995) o The New York Externality Study	<i>Bottom-up</i>	<b>País: EEUU (Estado de Nueva York)</b> Nuclear, petróleo, gas, carbón, hidráulica, biomasa, incineración y eólica. Desarrollo del modelo EXMOD software. Realizado por RCG/Hagler Bailly and Tellus Institute

UWM (Spadaro, 1999)	<i>Bottom-up</i>	Modelo que permite extrapolar resultados y así estimar impactos para cualquier región del mundo. Impactos sobre la salud humana. Fuentes fósiles, nuclear, hidráulica. Impactos sobre la salud, infraestructuras.
CAFE <sup>43</sup> (AEAT, 2005, 2005a)	<i>Bottom-up</i>	<b>Países de la Unión Europea</b> Realiza, para el periodo 2000-2020, el análisis coste beneficio de las políticas públicas. Impactos sobre la salud, infraestructuras, materiales, cultivos y ecosistemas.
NEEDS (NEEDS, 2005, 2007, 2008, 2009, 2009a) <sup>44</sup>	<i>Bottom-up</i>	Basado en la Metodología de las Vías de Impacto desarrollada en el proyecto ExternE. Analiza los impactos relacionados con el ciclo de vida de los combustibles teniendo en cuenta actividades <i>up-stream</i> y <i>down-stream</i> .

Fuente: Elaboración propia a partir de Spadaro (1999), Kim (2007) y Hohmeyer *et ál.* (1996)

Los estudios realizados por Hohmeyer (1988), Ottinger *et ál.* (1991) y Pearce *et ál.* (1992, 1995) han sido, sin lugar a dudas, los precursores de la investigación relacionada con las externalidades de la energía. A partir de estos tres trabajos, hubo un despliegue considerable de la materia, donde se asistió no solo a un avance metodológico sino también a la precisión de las vías de impacto asociadas con cada una de las fuentes.

En el Gráfico 3.1 es posible observar los resultados obtenidos en los primeros estudios desarrollados en el ámbito de las externalidades de la energía. Lee (1997) señala que las principales diferencias entre los primeros estudios (realizados hasta 1997) derivan básicamente de cinco factores: (a) metodología aplicada; (b) tasa de emisiones; (c) efectos de los sulfatos y nitratos; (d) efectos sobre infraestructuras; (e) cambio climático. En lo que se refiere a la metodología, los estudios precursores partían de valores de emisión de contaminantes o impactos estimados en otros

<sup>43</sup>Clean Air for Europe (CAFE) Programme. Documentación disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/general/keydocs.htm#integrated> (consulta realizada el 21 de enero de 2012)

<sup>44</sup>New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS) <http://www.needs-project.org/> (consulta realizada el 21 de enero de 2012)

estudios, para enseguida multiplicar por valores económicos, como por ejemplo el valor de una vida estadística. Por su parte, los estudios de desarrollo recientes suelen utilizar un mapeo completo de las vías de impacto y funciones del daño para estimarlos. Básicamente, tratan cada fuente de forma específica teniendo en cuenta sus características y la cadena del combustible. Surgen en este sentido las funciones concentración-respuesta o bien hacen uso de modelos de dispersión para estimar el comportamiento de los contaminantes una vez emitidos a la atmósfera. El segundo aspecto señalado por Lee (1997) son las tasas de emisión consideradas. Este autor afirma que en los primeros estudios las emisiones estimadas eran mucho más altas con relación a los más recientes. Por ende, era de esperar que las externalidades fuesen más elevadas en los primeros estudios. El tercer factor que realza la diferencia entre ambos grupos de estudios son los efectos de los contaminantes secundarios<sup>45</sup> (sulfatos y nitratos). Lee (1997) destaca en este sentido que las diferencias entre las tasas de emisión de SO<sub>2</sub> y los modelos de dispersión utilizados en estos estudios son la consecuencia de dichas diferencias. Los efectos sobre las infraestructuras también han variado considerablemente. En los primeros estudios llegaron a representar un 64% del daño total (Pearce *et ál*, 1992), sin embargo, en la actualidad solo representan una pequeña parte del impacto. El último aspecto son los efectos del cambio climático, puesto que la forma por la cual se trataron dichos impactos ha variado bastante a lo largo de los años. Lee (1997) afirma en este sentido que algunos estudios no han incluido dichos efectos entre sus valoraciones y otros que lo han hecho presentan resultados muy distintos. Menciona el estudio de Ottinger *et ál*. (1990), cuyos efectos del cambio climático abarcaron nada menos que un 24% del daño total (1,6 US\$ cent./kWh sobre 6,7 US\$ cent./kWh). Por su parte, Pearce *et ál*. (1992) estiman dichos efectos en 0,67 US\$ cent./kWh y el estudio realizado por Hohmeyer (1988) los estima entre 0,024-0,028 US\$ cent./kWh (1% del impacto total). Además de las diferencias señaladas por Lee (1997), hay otros aspectos como la escala de análisis, densidad poblacional, forma de tratar la mortalidad (VSL vs VOLY) y criterios de elección de las funciones concentración-respuesta.

Es conveniente resaltar que la dispersión de resultados entre los estudios precursores tiene que ver básicamente con las metodologías aplicadas, localización de las centrales y las características de las mismas. Cuando nos referimos a las metodologías aplicadas queremos decir que las vías de impacto pueden variar de un

---

<sup>45</sup>Lee (1997) menciona que en el estudio realizado por Hohmeyer (1988), las emisiones de SO<sub>2</sub> contabilizaron un 75% del daño total sobre la salud humana. En el estudio realizado por Ottinger *et ál*. (1991) los efectos del SO<sub>2</sub> ascendieron a un 60% del impacto total sobre la salud humana.

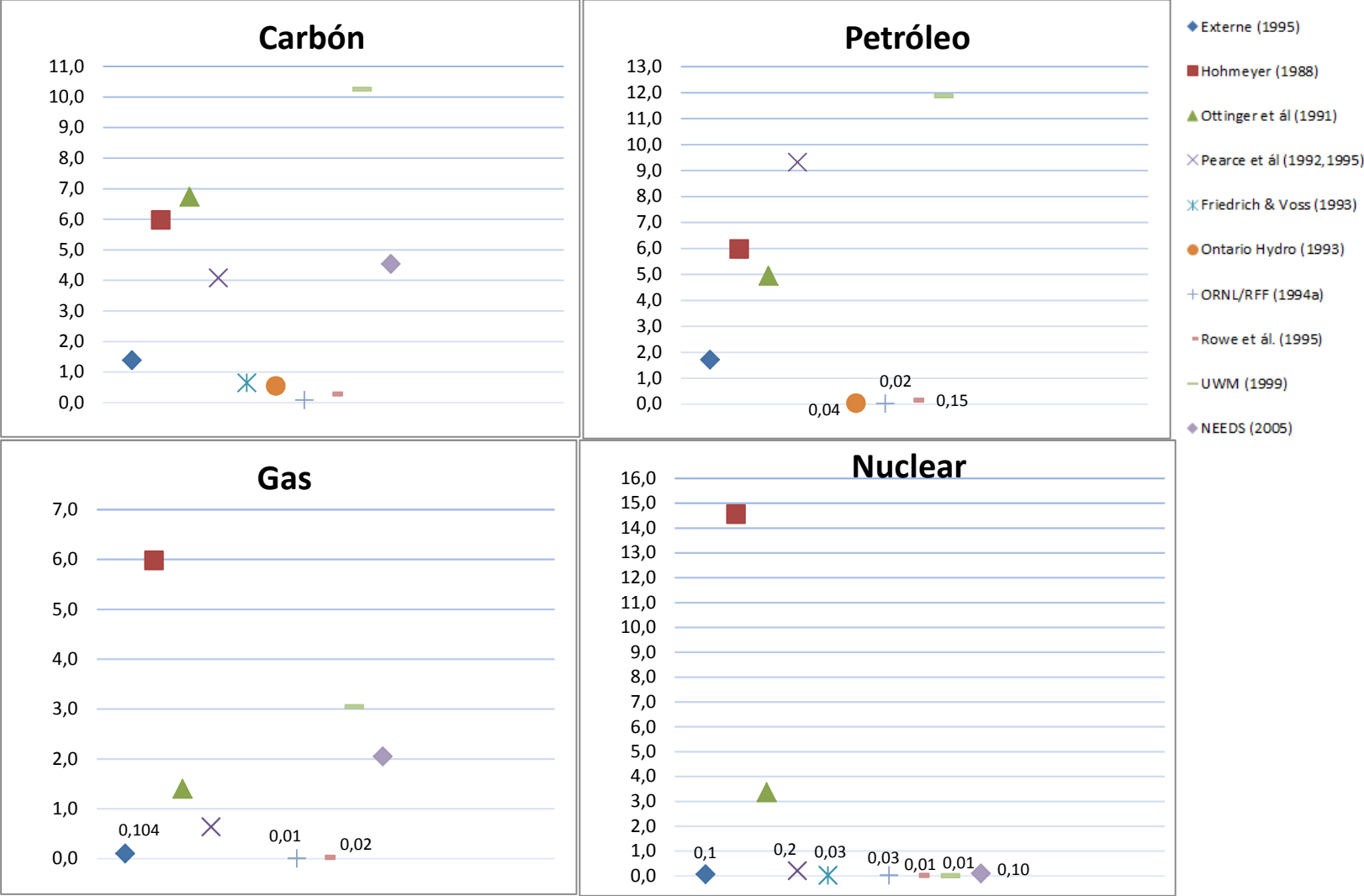
estudio a otro. Además, la forma de tratar una función concentración-respuesta puede también ser distinta. Las características de las centrales y sus emisiones son también factores relevantes; centrales con tecnologías más eficientes generarán menos emisiones y, por ende, menos daños y viceversa. Además, el enfoque del estudio suele influir considerablemente en los resultados. Si los estudios tienen por objeto centrales ubicadas cerca de grandes centros poblacionales, los efectos sobre la salud humana e infraestructuras serán obviamente más elevados.

En el Anexo 9 se presentan los valores de las externalidades de la energía estimados entre los estudios considerados precursores. Los valores deben ser tomados a modo indicativo puesto que el monto total de las externalidades podrá variar según los escenarios, metodologías y características de la central analizada.

En los apartados que siguen, analizaremos los principales estudios desarrollados hasta la fecha poniendo énfasis en la metodología utilizada y en los impactos considerados.



**Gráfico 3.1** Costes externos Resultados de algunos estudios, según fuente de generación de energía eléctrica (Céntimos de US\$; precios de 1995;por kWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Hohmeyer *et ál.* (1996), Spadaro (1999) y NEEDS (2009)

#### 3.4.1. *Hohmeyer (1988)*

Este estudio ha sido desarrollado por el Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung por encargo de la Comisión Europea. El principal objetivo de la investigación era iniciar el desarrollo de una base de datos sobre externalidades de la energía. Esta base serviría de guía para que el Gobierno tomara acciones correctivas en lo que se refiere a trabas de mercado que impidiesen el desarrollo de fuentes renovables. Se trata además de un estudio con enfoque *Top-down* que valora el daño ambiental en Alemania producido por el sector de los combustibles fósiles.

No cabe duda de que este estudio, entre los llamados precursores, es el más conocido. No obstante, algunos problemas en sus estimaciones han entorpecido una eventual extrapolación de los datos encontrados hacia otro contexto o tecnología. Spadaro (1999) resalta tres clases de problemas asociados con este estudio: a) imprecisión de los valores utilizados para ejecutar el análisis; b) tratamiento incompleto de todos los ciclos del combustible; c) ausencia de información en lo que se refiere a la ubicación de las centrales. Prueba de ello es que, si observamos los resultados presentados en el Gráfico 3.1 y en el Anexo 9, veremos que en este estudio se atribuye el mismo nivel de impacto para centrales a carbón, petróleo y gas, hecho que no es cierto dado que el impacto a partir de dichas centrales suele variar bastante.

#### 3.4.2. *Ottinger et ál. (1991) Pace University Study*

Este estudio ha sido desarrollado bajo el auspicio del Departamento de Energía Estadounidense. El objetivo fundamental del proyecto era ofrecer una fuente de información que asistiese al Gobierno, reguladores y legisladores en la formulación de políticas.

La característica fundamental de este estudio es que para valorar el impacto total se hizo uso de valores estimados en estudios previos. Los principales resultados encontrados en este estudio han sido expuestos en el Anexo 9. No obstante, conviene apuntar algunos aspectos relacionados con las estimaciones realizadas. El primer aspecto tiene que ver con las estimaciones vinculadas con el impacto de la energía nuclear. Como se puede observar en el Gráfico 3.1 el impacto de las nucleares es superior con relación a los demás estudios. Spadaro (1999) resalta que dicha sobrestimación redundaba del hecho de que las estimaciones de salud ocupacional son aproximadamente seis veces más elevadas que en los demás estudios debido a que

están basadas en datos de centrales nucleares antiguas. Además, en este estudio, las estimaciones asociadas con los accidentes nucleares tuvieron en cuenta el accidente de Chernobyl y, por ende, son ocho veces más elevadas con relación a las estimaciones realizadas en Francia cuando se realizó el proyecto ExternE. El otro detalle asociado con este estudio es que aplicó el “Valor de una Vida Estadística” (VSL)<sup>46</sup> del orden de US\$ 4 millones.

#### 3.4.3. *Pearce et ál. (1992, 1995)*

Este estudio se llevó a cabo por el Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE)<sup>47</sup>, por encargo del Departamento de Industria y Comercio de Reino Unido. El objetivo del mismo era, en primer lugar, realizar una exhaustiva revisión de la literatura relacionada con el coste social de la energía y aplicar dichos valores para estimar el total del daño para Reino Unido. En cierta medida, actualiza el estudio realizado por Ottinger *et ál.* (1991).

El proyecto tuvo en cuenta trece tipos de tecnologías y las siguientes categorías de impacto: salud humana<sup>48</sup>, cultivos, bosques, diversidad biológica, infraestructuras, ruido, cambio global, suelos, agua y visibilidad. En el caso de la salud humana atribuye un VSL entre 1,7 y 3 millones de dólares estadounidenses.

Más tarde (1995) se actualizaron los datos utilizados en el estudio anterior.

#### 3.4.4. *Friedrich & Voss (1993)*

Esta investigación analiza los costes externos para Alemania (*Top-down*) y ofrece resultados asociados con las centrales a carbón, nuclear, eólica y fotovoltaica. Los impactos analizados fueron: bosques, agricultura, fauna, infraestructuras, salud humana y accidentes nucleares.

El VSL aplicado en este estudio fue de US\$ 2,9 millones y se aplicó una tasa de descuento de un 4%.

---

<sup>46</sup> El VSL es aplicado para valorar económicamente la mortalidad crónica. Este parámetro será tratado más adelante.

<sup>47</sup> University College London.

<sup>48</sup> Incluye aspectos asociados con la mortalidad, morbilidad y accidentes.

#### 3.4.5. *Ball et ál. (1994)*

El estudio realizado por Ball *et ál.* (1994) resulta ser una revisión de la literatura, cuyo objetivo era comparar los riesgos asociados con siete tipos de ciclos de combustible utilizados en la generación de electricidad y que seguirían operando en Reino Unido en los próximos diez años contados a partir de la fecha del estudio.

Una de las características del estudio es que realiza un análisis de la cadena del combustible y enfoca los riesgos asociados con la salud pública y ocupacional. Además, pese a que considera relevantes los impactos de la lluvia ácida y del efecto invernadero, dichos impactos no son cuantificados. Además, no ofrece una valoración monetaria.

#### 3.4.6. *Ontario Hydro (1993)*

El objetivo fundamental de este proyecto era evaluar los impactos ambientales y sobre la salud humana como resultado de la operación de siete centrales pertenecientes a la compañía Ontario Hydro, localizadas en la provincia de Ontario, Canadá. Por este motivo, el estudio tiene un enfoque *Bottom-up* y se aplica la Metodología de las Vías de Impacto o “función daño” para evaluar los efectos originados a partir de una serie de etapas *downstream* y *upstream*<sup>49</sup>.

Para la evaluación de los impactos sobre la salud humana, se aplica un valor estadístico de la vida del orden (VSL) de 4,8 millones de dólares estadounidenses y se utilizan distintas tasas de descuento.

Una de las principales contribuciones del proyecto es el intento de internalizar las externalidades en la planificación de las centrales, así como utilizarlas en el proceso de toma de decisión.

#### 3.4.7. *ORNL/RFF (1994, 1994a)*

El Departamento de la Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés) encargó la elaboración de este estudio al Oak Ridge National Laboratory (ORNL) y al al Resources for the Future (RFF). El ámbito geográfico se restringe a los Estados Unidos y se aplica la Metodología de las Vías de Impacto. Dicha metodología es utilizada para medir los impactos medioambientales y, para ello, abarca cuatro

---

<sup>49</sup> *Upstream*: básicamente son las actividades de explotación y distribución de petróleo y gas, por ejemplo. *Downstream*: se refiere a las actividades de refino, venta y distribución.

pasos básicos: (a) determinar el inventario de emisiones (ej. kg de PM<sub>10</sub> emitido por una determinada fuente); (b) dispersión de los contaminantes; (c) cálculo del impacto causado por la exposición a un determinado contaminante; (d) valoración de los impactos en términos monetarios. Además, el objetivo fundamental es, a partir de los costes externos, apoyar el proceso de investigación y desarrollo de nuevas fuentes de energía.

Otra característica del estudio es que no pone énfasis en los impactos ambientales. En contrapartida, los aspectos asociados con la salud humana y otros impactos tienen un peso relativo más elevado. Para ello, evalúa los efectos globales asociados con el ciclo del combustible de seis tipos de generación: carbón, petróleo, gas, hidráulica, nuclear y biomasa.

Una de las conclusiones del estudio es que la generación a partir de la biomasa y combustibles fósiles es la que presenta el coste externo más elevado por kWh de energía producida<sup>50</sup>. No obstante, tal y como se puede comprobar en el Anexo 9, los costes externos encontrados por este estudio son relativamente bajos con relación a otros estudios. Dicha diferencia ocurre debido a la omisión de determinados impactos ambientales como, por ejemplo, los efectos del cambio climático y también debido a la escala del análisis (fuentes ubicadas en zonas rurales).

#### 3.4.8. Rowe (1995) o *The New York Externality Study*

Se trata de un estudio *Bottom up* realizado por el RCG/Hagler Bailly y el Tellus Institute, encargado por el Empire State Electric Energy Research Corporation, Electric Power Research Institute y el New York State Energy Research. Analiza el impacto asociado con las siguientes actividades: carbón, petróleo, gas, nuclear, hidroelectricidad, biomasa, eólica y solar. El ámbito geográfico es el estado de Nueva York (EEUU) y los receptores del impacto considerados son aire, suelos y agua.

La principal contribución de este proyecto ha sido el desarrollo de la aplicación informática "EXMOD". En términos de resultados, la externalidad asociada con la mortalidad (expresada en términos del VSL) presenta el coste externo unitario más elevado. A consecuencia, los impactos asociados con las emisiones atmosféricas explican un 85% del daño total (Kim, 2007). En términos de coste externo por kWh de energía producida, la biomasa, el carbón y el petróleo son los que más impactos

---

<sup>50</sup>Biomasa: 0,186 céntimos de dólar estadounidenses. Véanse demás estimaciones en el anexo 9.

generan, respectivamente. Por otro lado, la eólica es la fuente que dispone del menor coste externo unitario<sup>51</sup>.

#### 3.4.9. *El proyecto ExternE (European Comission, 2005)*

No sería exagerado decir que el ExternE es uno de los estudios más relevantes en términos de valoración económica de las externalidades de la energía. Se trata de un estudio auspiciado por la Comisión Europea. En un primer momento se presentaron sus resultados solamente para Francia, Reino Unido y Alemania pero en las siguientes actualizaciones se han ido incorporando estimaciones para los demás Estados miembros de la Unión Europea. Además, culminó con la elaboración de la aplicación informática “EcoSense”.

Para lograr este objetivo, aplica la Metodología de las Vías de Impacto (IPA, en adelante)<sup>52</sup>, fundamentada en cuatro bloques secuenciales (véase diagrama en la Figura 3.1 ). El primero tiene que ver con el conocimiento de la fuente causadora de la contaminación, lo que incluye la tecnología empleada, localización y, obviamente, el inventario de emisiones. El segundo bloque se asocia con el estudio de la dispersión de los contaminantes una vez que son emitidos a la atmósfera. La meticulosidad por la cual el ExternE trata la dispersión de los contaminantes es, sin lugar a dudas, una de sus principales contribuciones. A tal efecto, utiliza una combinación de modelos de dispersión a escala local y regional. A nivel local (<50km a partir de la fuente emisora), utiliza el modelo ISC (Industrial Source Complex)<sup>53</sup> para fuentes estacionarias como, por ejemplo, centrales termoeléctricas, y el ROADPOL para aquellas emisiones asociadas con el sector de transportes. A escala regional, utiliza el WTM<sup>54</sup> (Windrose Trajectory Model) para estimar la concentración de los contaminantes secundarios (ej. sulfatos a partir de las emisiones de SO<sub>2</sub> y nitratos). Para el ozono (O<sub>3</sub>) aplica el EMEP MSC-W oxidant model, que es el modelo oficial utilizado por la Unión Europea en lo que se refiere a las políticas relacionadas con la contaminación atmosférica transfronteriza. La tercera etapa tiene por objetivo relacionar el impacto con el aumento de la concentración. El principio fundamental de este bloque es correlacionar el cambio en el comportamiento de un determinado impacto en función del aumento de la concentración de un contaminante. Para ello, se hace uso de las funciones

---

<sup>51</sup>Véase anexo 9 para consultar los costes externos por kwh,

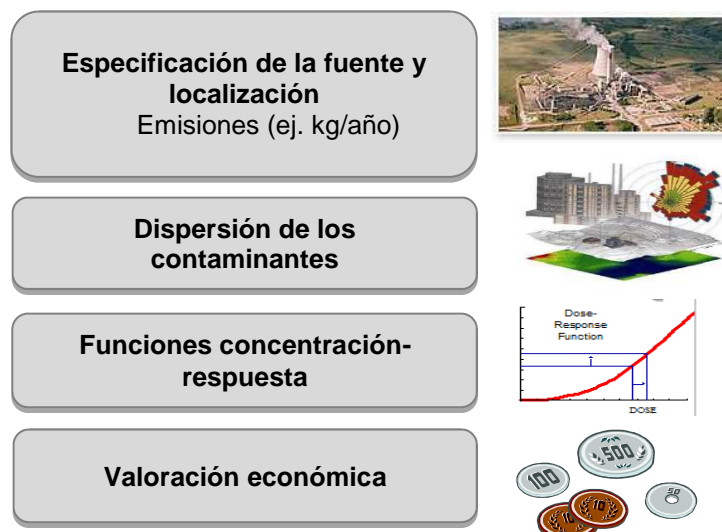
<sup>52</sup>Impact Pathway Approach

<sup>53</sup>El ISC (corto plazo) es un modelo de pluma gaussiana ampliamente utilizado para evaluar la concentración de contaminantes y el flujo de deposición de los mismos a causa de la emisión provocada por una variedad de fuentes.

<sup>54</sup>El WTM es un modelo lagrangiano de difusión de partículas, que ha sido derivado delHarwell Trajectory Model.

concentración- respuesta (ej. casos de asma debido a un determinado incremento de ozono). Por último, se aplica la valoración económica con el objetivo de homogeneizar los impactos en términos monetarios. Para estimar el coste unitario, por ejemplo, de una determinada enfermedad se utiliza la valoración contingente (ej. disposición a pagar para evitar el sufrimiento) o, dependiendo del caso, el coste privado para paliarla (coste del medicamento, coste para la salud pública, etc.).

**Figura 3.1** Metodología de las vías de impacto



Fuente: Proyecto ExternE (European Comission, 2005)

El ExternE ofrece una valoración de los siguientes grupos de impactos:

- Impactos medioambientales:** como resultado de la emisión/liberación de contaminantes (ej. partículas, metales pesados, etc.) o energía (calor, ruido y radiación) en el entorno (aire, suelo y recursos acuíferos). Dichas sustancias o energía son transportadas y transformadas hasta alcanzar los receptores del daño: personas, infraestructuras y ecosistemas. Para evaluar dichos daños, se aplica la Metodología de las Vías de Impacto.
- Calentamiento global:** impactos resultantes de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, primero se estima un daño a partir de un análisis *Top-down*. Además, debido a la gran incertidumbre que suponen los aspectos relacionados con el cambio climático, se aplica el método del coste evitado en el caso de que se lograra una reducción de los objetivos de emisión.
- Accidentes:** impactos asociados con eventuales accidentes. Para ello, se estima el riesgo público de los posibles accidentes (daño multiplicado por la

probabilidad de accidentes). Es interesante resaltar que el ExternE todavía no estima aquellos costes asociados con la aversión al riesgo o el miedo asociado con eventuales accidentes nucleares.

Las fuentes analizadas en el ExternE corresponden a la producción de energía, transportes e incineración. En términos de energía se evalúan siete ciclos diferentes del combustible (carbón, lignito, petróleo, gas, nuclear, eólica e hidráulica), cuyos impactos dependerán del sitio donde se encuentren instaladas.

Tratándose de los contaminantes estudiados, por un lado se incluyen los contaminantes clásicos: partículas (PM), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) y sus respectivos contaminantes secundarios (sulfatos y nitratos). Además, se estudian los efectos de los metales pesados<sup>55</sup> sobre la salud. Los contaminantes incluidos en el ExternE y sus efectos sobre la salud coinciden con la clasificación ofrecida en la Tabla 3.2, exceptuándose el monóxido de carbono.

En términos de resultados, dentro del primer grupo de impactos mencionados arriba (medioambientales), conviene apuntar que los costes sobre la salud humana son los más representativos, especialmente aquellos producidos por la mortalidad crónica. Este último aspecto sanitario es valorado a partir de un VSL del orden de 1 millón de euros (precios del 2004) y sigue la metodología de los años de vida perdidos (YOLL). Es conveniente resaltar que, en las primeras ediciones del ExternE, la mortalidad era expresada en términos del número de muertes prematuras asociadas con la contaminación, en vez de en la pérdida de expectativa de vida debido a la contaminación. La diferencia entre ambas metodologías y sobre todo la disparidad de resultado entre ambas será discutida en el siguiente capítulo. Otro aspecto sanitario muy representativo es la bronquitis crónica. Las principales funciones concentración-respuesta asociadas con la salud humana y utilizadas en el ExternE están representadas en la Tabla 3.4. No conviene perder de vista que el ExternE, además de los impactos sobre la salud humana, valora otros impactos como aquellos relacionados con infraestructuras, ecosistemas, accidentes y cambio global.

---

<sup>55</sup>As (Arsénico), Cd (Cadmio), Cr<sup>IV</sup> (Cromo), Hg (mercurio), Ni (Níquel) y Pb (Plomo). Los efectos de los metales pesados ocurren en el momento de su ingestión, sobre todo mediante el alimento. Se establecen en este sentido funciones dosis- respuesta con un elevado grado de complejidad para estimar dichos impactos.



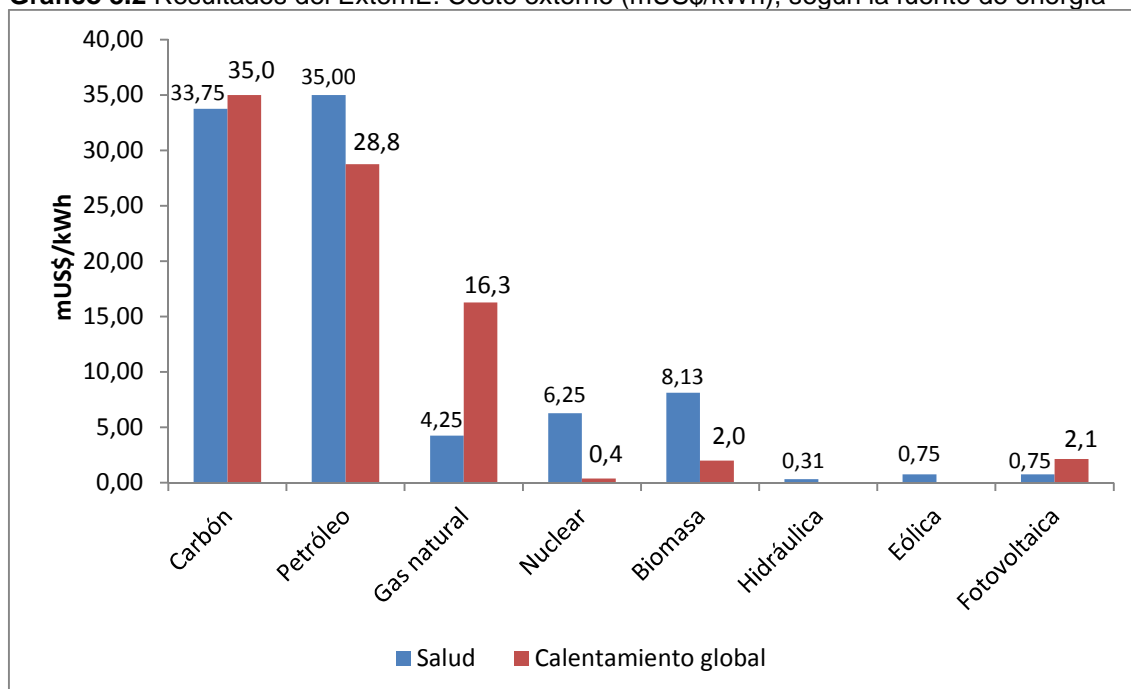
**Tabla 3.4** CRF utilizadas en el proyecto ExternE

<b>Mortalidad</b>
Pérdida de expectativa de vida - YOLL: Mortalidad crónica (adultos > 30 años de edad) ( <i>long term</i> mortalidad)
Pérdida de expectativa de vida - YOLL: Mortalidad aguda (toda población) ( <i>short term</i> mortalidad)
Mortalidad infantil
<b>Morbilidad</b>
Bronquitis crónica – nuevos casos (adultos > 27 años)
Ingresos hospitalarios – causas respiratorias (todas las edades)
Consultas - primeros auxilios (asma, enfermedades del tracto respiratorio superior)
Días de actividad restringida (adultos entre 18 y 64 años)
Días de actividad restringida menor (adultos entre 18 y 64 años)
Días de trabajo perdidos (adultos entre 18 y 64 años)
Uso de broncodilatadores (adultos; >20 años y niños)
Síntomas del tracto respiratorio inferior (adultos enfermedades respiratorias crónicas y niños 5-14 años)
Síntomas respiratorios agudos (toda la población)
<b>Morbilidad (O<sub>3</sub>)</b>
Mortalidad – <i>short term exposure</i> (toda la población)
Ingresos hospitalarios – causas respiratorias (todas las edades)
Consultas - rinitis alérgica (adultos;15-64 y niños;15-64)
Días de actividad restringida menor (adultos 18-64)
Uso de broncodilatadores (adultos; >20 años y niños)
Síntomas respiratorios agudos (niños 5-14 años)
<b>Metales pesados, dioxinas y otros contaminantes</b>
Cáncer (As, Cd, CrVI y Ni) + Dioxinas
Cáncer debido a la inhalación de benceno, formaldehído, butadieno y benzopireno
Impactos neurotóxicos (Pb)
<b>Ruido</b>
Infarto de miocardio – eventos fatales (YOLL)
Infarto de miocardio – eventos no fatales (días en el hospital)
Infarto de miocardio – eventos no fatales (absentismo laboral)
Infarto de miocardio –morbilidad
Angina de pecho (días en el hospital)
Angina de pecho (absentismo laboral)
Angina de pecho – días esperados de morbilidad
Hipertensión (días en el hospital)
Disturbios del sueño (tráfico viario)
Disturbios del sueño (tráfico ferroviario)
Disturbios del sueño (tráfico aéreo)

Fuente: Elaboración propia a partir del proyecto ExternE (European Comission, 2005)

En el Gráfico 3.2 se pueden observar los principales resultados del ExternE, expresados según la fuente de energía y categoría del impacto (salud y calentamiento global). Es ilustrativo observar que los combustibles fósiles son las fuentes que más impacto generan, fundamentalmente la generación a carbón.

**Gráfico 3.2** Resultados del ExternE: Coste externo (mUS\$/kWh), según la fuente de energía



(a) US\$, precio del 1998

(b) 1mUS\$ = 0,001 US\$

Fuente: Elaboración propia a partir de Spadaro (1999)

En el Anexo 10 se exponen con mayor rigor y detalle los costes externos asociados con cada fuente de energía y según el continente (Europa). Por último, es importante destacar que en el ExternE también se ha realizado un exhaustivo análisis de incertidumbre de los resultados, así como de la sensibilidad de los datos.

#### 3.4.10. Proyecto CAFE (AEAT, 2005, 2005a)

El programa del “Aire puro para Europa” surge a iniciativa de la Comisión Europea<sup>56</sup> con el objetivo de elaborar una estrategia a largo plazo para Europa, relacionada con la contaminación atmosférica. Los principales objetivos del proyecto son:

- a) Crear información científica sobre los efectos de la contaminación, inventario de contaminantes, mecanismos de valoración de la calidad del aire y objetivos, indicadores y medidas dirigidas a reducir la contaminación en las ciudades europeas.

<sup>56</sup>Comisión de las Comunidades Europeas, 2001, *Comunicación de la Comisión: El programa Aire puro para Europa*, hacia una estrategia temática en pro de la calidad del aire, Bruselas, 04.05.2001, COM (2001), p. 245, final.

- b) Apoyar la implementación de nuevas legislaciones y valorar la eficacia de las ya existentes.
- c) Promocionar medidas sectoriales dirigidas a reducir la contaminación.
- d) Diseñar una estrategia integrada con objetivos apropiados para la calidad del aire, así como medidas coste-efectivas para alcanzarlos.

A consecuencia de los objetivos mencionados arriba, se elaboró un Análisis Coste Beneficio para valorar los impactos asociados con la salud humana, infraestructuras, cultivos y ecosistemas. Para ello, la valoración económica de las externalidades realizada en el CAFE tuvo en cuenta efectos relacionados con las partículas (PM<sub>2,5</sub>), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, compuestos orgánicos volátiles y amoníaco (NH<sub>3</sub>), cuyas externalidades han sido valoradas en términos monetarios. Dichos impactos (directos e indirectos) han sido representados en la Tabla 3.5.

Es relevante señalar que una de las contribuciones del CAFE es la comparación de los costes externos entre escenarios. Es decir, el proyecto promueve un análisis del estado actual de los mismos y su composición futura (beneficios y costes evitados) en el caso de que se aplicara la legislación europea en términos de calidad del aire. De esta forma, dos escenarios han sido previstos: el año de partida (2000) y 2020.

**Tabla 3.5** Impactos y contaminantes valorados en el CAFE

	PM <sub>2,5</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	VOCs	NH <sub>3</sub>
<b>Impactos directos</b>					
Formación de ozono troposférico, que conlleva efectos sobre la salud, cultivos, infraestructuras y ecosistemas.			X	X	
Impactos sobre la salud causados por contaminantes primarios y secundarios (ozono y aerosoles).	X	X	X	X	X
Acidificación de ecosistemas.		X	X		X
Eutrofización de ecosistemas.			X		X
Daños a infraestructuras.		X	X		
<b>Impactos indirectos</b>					
Cambios en las emisiones de GEI como resultado de las medidas de control de los contaminantes valorados en el programa "Aire puro para Europa".	X	X	X	X	X
Efectos socioeconómicos de los impactos y las medidas recomendadas para su control.	X	X	X	X	X

Fuente: Proyecto CAFE (AEAT, 2005a)

Tratándose de los impactos sobre la salud, los resultados del CAFE comparan el valor de las externalidades entre el escenario de partida (2000) con 2020, en el caso de que se implementara la actual legislación europea en materia de calidad del aire. En la Tabla 3.6 se presentan los principales resultados del proyecto CAFE en lo que concierne a los impactos sobre la salud humana.

**Tabla 3.6** Resultados del proyecto CAFE, en el caso de que se aplicara la actual legislación europea (mil millones de euros): 2000 - 2020

Contaminante / aspecto sanitario	2000		2020		Beneficio	
	LI	LS	LI	LS	LI (resultado preferido)	LS
<b>Salud humana</b>						
<i>O<sub>3</sub> Mortalidad</i>	1,12	2,51	1,09	2,43	0,03	0,08
<i>O<sub>3</sub> Morbilidad</i>	6,3	6,3	4,2	4,2	2,1	2,1
<i>PM Mortalidad</i>	190,2	702,8	129,5	548,2	60,7	154,6
<i>PM Morbilidad</i>	78,3	78,3	54,1	54,1	24,2	24,2
<b>Total</b>	<b>275,9</b>	<b>789,9</b>	<b>188,9</b>	<b>608,9</b>	<b>87,0</b>	<b>181,0</b>
	Valor (mil millones de €)		Valor (mil millones de €)		Valor (mil millones de €)	
<b>Agricultura</b>	2,8		1,5		1,3	
<b>Infraestructura</b>	1,1		0,7		0,4	

Fuente: AEAT(2005a)

(a) Valores en mil millones de euros.

(b) LI = Límite inferior ; LS = Límite superior

Las conclusiones del proyecto CAFE apuntan a que de aplicarse de forma correcta la legislación europea, hasta 2020 el beneficio total redundaría en unos 87 mil millones de euros, partiendo de una estimación más conservadora, y en 181 mil millones de euros la más alta, lo que correspondería (AEAT, 2005a) a una cifra de entre un 3% y 10% del PIB europeo (a precios del 2000), según el límite considerado (inferior o superior). Además, dicho coste supondría entre, aproximadamente, unos 191 y 397 euros por habitante, dependiendo de la estimación realizada (límite superior e inferior) (AEAT, 2005a). Conviene resaltar que la diferencia entre los resultados de la mortalidad asociados con las partículas tiene que ver con el tipo de metodología utilizada para estimar este aspecto. En el límite inferior, la mortalidad ha sido expresada en términos del valor de un año de vida (años de vida perdidos – YOLL) en cuanto que en el límite superior se aplicó el valor de una vida estadística (VSL basado en el número de muertes). En el capítulo 5, a la hora de estudiar la función concentración-respuesta asociada con la mortalidad crónica, abordaremos las diferencias entre las distintas metodologías y sus consecuencias sobre los costes externos asociados con la mortalidad.

Además de los impactos sobre la salud humana, el proyecto CAFE realiza una valoración económica de los daños sobre cultivos (reducción de la superficie cultivable debido a la exposición al ozono) e infraestructuras (deposición de ácidos sobre, por ejemplo, edificios). En este sentido, el CAFE ha estimado que, de implementarse la legislación actual, el beneficio para la agricultura asociado con una reducción de las emisiones de ozono redundaría en 1,3 mil millones de euros para el periodo 2000-2020. Además, las pérdidas estimadas para la agricultura (año 2000) ascenderían a unos 2,8 mil millones de euros a causa de la exposición al ozono. En lo que se refiere a los daños a infraestructuras, las pérdidas alcanzarían unos 1,1 mil millones de euros (2000) y el beneficio asociado con la reducción de la deposición de materiales ácidos para el periodo 2000-2020 redundaría en 0,4 mil millones de euros (véase Tabla 3.6).

#### 3.4.11. Proyecto NEEDS (NEEDS, 2009)

El objetivo del proyecto NEEDS<sup>57</sup> fue valorar los costes y beneficios asociados con la actual política energética y de los futuros sistemas energéticos europeos. Como precepto fundamental utiliza la Metodología de las Vías de Impacto, desarrollada en el proyecto ExternE, para evaluar las externalidades futuras de las distintas tecnologías y de las políticas europeas<sup>58</sup>. El proyecto tuvo una duración de 54 meses y sus resultados se presentaron en febrero de 2009.

El desarrollo del proyecto abarca cuatro aspectos fundamentales: análisis de ciclo de vida de las futuras tecnologías; valoración económica de las externalidades asociadas con el ciclo de vida de las mismas; aplicación de las externalidades para apoyar el diseño de políticas y escenarios energéticos, y empleo de mecanismos de toma de decisiones multicriterio para evaluar las distintas opciones tecnológicas.

La valoración económica de las externalidades aplicada en el NEEDS analiza las siguientes categorías de impactos: salud humana, pérdida de biodiversidad, superficie cultivable e infraestructuras. El NEEDS considera un amplio abanico de contaminantes, tales como los metales pesados, y sus respectivos impactos sobre cada categoría estudiada. En la Tabla 3.7 se presenta un resumen de los impactos causados por las emisiones atmosféricas según los principales contaminantes.

---

<sup>57</sup>NEEDS: New Energy Externalities Development for Sustainability

<sup>58</sup>El alcance del NEEDS cubre los países miembros de la Unión Europea así como algunos países mediterráneos asociados como Egipto, Marruecos y Túnez.

**Tabla 3.7** Costes externos por tonelada de contaminante (precios del año 2000) Unión Europea 27 países (UE-27)

<b>Emisiones atmosféricas (2010)</b>	<b>Categorías de impactos (€/kg; precios año 2000)</b>			
	Salud humana	Biodiversidad	Cultivos	Infraestructuras
PM <sub>10-2,5</sub> (coarse)	1,3	N/A	N/A	N/A
PM <sub>2,5</sub> (finas)	24,6	N/A	N/A	N/A
NO <sub>x</sub>	5,7	0,9	0,3	0,07
SO <sub>2</sub>	6,3	0,2	-0,04	0,3

Fuente: Elaboración propia a partir del proyecto NEEDS (NEEDS, 2009)

La principal diferencia del NEEDS con relación a otros proyectos es que valora no solo las externalidades asociadas con futuras fuentes de energía, sino que también estima la inversión futura necesaria para desarrollar dichas tecnologías. Para lograr este objetivo, estima la reducción de los costes asociados con el desarrollo de nuevas fuentes según la curva de aprendizaje de una determinada tecnología. Así, estima el comportamiento de los costes de las siguientes fuentes: eólica, fotovoltaica, biomasa, solar, célula combustible, hidrógeno, nuclear y mareomotriz.

## **Capítulo 4 : El Uniform World Model (marco metodológico)**

#### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con la metodología aplicada en esta investigación. En particular, se ofrece un riguroso análisis del Uniform World Model que, como se ha mencionado anteriormente, es el modelo que será aplicado para valorar económicamente las externalidades producidas por la central de Candiota. Para lograr este objetivo, el capítulo se divide en dos bloques conceptuales generales. El primero tiene que ver con las características del UWM, operatividad y principales aspectos metodológicos. El segundo analiza los componentes que son requeridos por el UWM para el estudio de las externalidades asociadas al caso de estudio. Dichos componentes son, en cualquier caso, los datos de entrada que serán introducidos en el modelo (*input*) con el objetivo de conocer las externalidades (*output*) que impone la central termoeléctrica.

El Uniform World Model (UWM, en adelante) es un modelo dirigido a la valoración económica de las externalidades causadas por la exposición a contaminantes emitidos a partir de una fuente elevada o situada a nivel del suelo. El UWM dispone de una metodología simplificada y transparente que identifica los parámetros más significativos para la ejecución del análisis. Es relativamente fácil de implementar y requiere una cantidad limitada de datos que por sus características no son difíciles de obtener. Es aplicable tanto para modelar un impacto producido por una sola fuente estática (*Bottom-up*) como para un área determinada (*Top-down*) o bien una fuente móvil. No obstante, la opción por la simplicidad no compromete la precisión y validez de los resultados en lo que se refiere a su utilización en otros modelos ni su robustez para una eventual inclusión dentro de un determinado proceso de toma de decisión. Como se verá más adelante, los resultados del UWM son muy equilibrados con relación a otros modelos más detallados y de reconocido prestigio.

Su funcionalidad permite estimar económicamente los impactos producidos por fuentes radiológicas, termoeléctricas e hidroeléctricas. Tratándose de los impactos relacionados con la contaminación atmosférica, el modelo abarca tres posibles receptores del impacto: salud humana, agricultura e infraestructuras. Además, dispone de dos vertientes que varían en función de la complejidad del análisis que se requiera. Si el objetivo es estimar el impacto producido por una fuente específica y, sobre todo, sus efectos a escala local, se puede utilizar la versión más robusta del modelo



(RUWM<sup>59</sup>). En este caso, las características de la población a nivel local y los aspectos técnicos de la fuente (ej. altura de la chimenea, temperatura de salida de los gases, etc.) son considerados en el análisis. Por otro lado, si el objetivo es obtener un valor aproximado a nivel regional o nacional sin necesidad de evaluar los efectos a escala local, la versión simplificada (SUWM<sup>60</sup>, en adelante) presenta también resultados muy coherentes. El SUWM permite estimar de una forma rápida y con gran eficacia el impacto producido por una fuente contaminante. En esta versión, la densidad poblacional, la dispersión atmosférica y las funciones concentración-respuesta son tratadas como constantes e independientes de la localización y características de la fuente emisora.

Spadaro (1999) señala que las estimaciones alcanzadas por el UWM, en el caso de fuentes con tamaño de chimenea superior a 25 m, presentan resultados muy próximos con respecto a metodologías con mayor rigor de detalles, así como cuando se trata de fuentes ubicadas en grandes centros poblacionales. Cuando se trata de fuentes localizadas en zonas rurales, los resultados son todavía más ajustados a los modelos más complejos.

Por este motivo, el UWM viene siendo utilizado como una herramienta muy eficiente a la hora de estimar el impacto generado por una serie de fuentes contaminantes. Con tan solo cinco parámetros se pueden alcanzar resultados bastante aproximados con relación a métodos que exigen una gran complejidad de datos. Spadaro (1999) argumenta en este sentido que para gran parte de las decisiones asociadas con temas medioambientales solamente se necesita un valor aproximado, sin que se requieran resultados específicos allí donde esté localizada la fuente (a escala local).

Tal y como se explicará en el siguiente apartado, la sencillez operativa y confianza del UWM hizo que este modelo haya sido elegido para estudiar las externalidades asociadas al caso de estudio de la central Candiota.

---

<sup>59</sup>Robust Uniform World Model (RUWN).

<sup>60</sup>Simplified Uniform World Model (SUWM)

## 4.2. Instrumentalización del UWM: Aspectos metodológicos

### 4.2.1. Premisa inicial

Para la instrumentalización del método elegido, se utiliza la versión robusta (RUWM), cuyo producto final será estimar la externalidad sobre la salud humana impuesta por la central termoeléctrica de Candiota. La elección del modelo se justifica por la facilidad de uso y la cantidad limitada de datos que requiere. Los impactos sobre la salud humana son calculados en función de una serie de variables, tales como: cantidad de ataques de asma, ingresos hospitalarios causados por enfermedades respiratorias, casos de bronquitis, casos en colectivos especialmente afectados (ancianos, niños y personas enfermas, etc.). Todos estos impactos son traducidos en valores monetarios.

Conviene señalar que la versión simplificada del modelo (SUWM) se caracteriza por el hecho de que requiere menos datos en comparación con el RUWM. Por otro lado, la versión robusta (RUWM) es muy eficaz en el análisis de los efectos a nivel local o bien cuando se trata de una fuente ubicada en un centro urbano. En cuanto a los resultados, la diferencia básica entre el SUWM y el RUWM consiste en la estimación del impacto proveniente de los contaminantes primarios. En este sentido, la estimación de las externalidades asociadas al caso de estudio de la central Candiota tuvo en cuenta la versión robusta del modelo, puesto que se considera relevante estudiar los efectos a nivel local.

De forma general, la ecuación del modelo demanda solamente cinco tipos de datos: la densidad poblacional, las funciones concentración-respuesta, la tasa de emisión de un determinado contaminante, el coste unitario del aspecto sanitario analizado (ej. coste por cada caso de bronquitis) y la velocidad de remoción de un determinado contaminante.

### 4.2.2. Metodología del UWM

#### 4.2.2.1. El Simplified Uniform World Model (SUWM)

Imaginemos una fuente (ej. central termoeléctrica) que emite un contaminante  $p$  a una tasa  $Q_p$ . Dicho contaminante  $p$  es considerado una especie primaria debido a que es emitido directamente por la fuente emisora. Una vez emitido a la atmósfera, sufre transformaciones químicas que dan origen a los llamados contaminantes

secundarios,  $s$ ; cuya formación dependerá obviamente de la tasa de emisión,  $Q_p$ , pero también de otros dos factores como la tasa de remoción atmosférica de  $p$  debido a la deposición seca y húmeda y a la tasa de transformación química<sup>61</sup> relacionada con la conversión de  $p$  a  $s$ . La tasa de deposición dependerá de una serie de factores como las condiciones climáticas (ej. tasa de precipitación), periodo del día o estación del año, tipo de terreno (uso de la tierra) y del tamaño de la partícula<sup>62</sup>. De esta forma, teniendo en cuenta los supuestos mencionados arriba, los impactos sobre la salud humana causados por una exposición directa a contaminantes primarios o secundarios son estimados según la ecuación de abajo (Spadaro, 2011):

$$I = I_0 e^{\beta(C - C_0)} \approx I_0 [1 + \beta(C - C_0)]$$

*Ecuación 4-1*

$I$  es el impacto total (resultado de la suma de todos los impactos) entre la zona (área) afectada, expresados en términos de casos por año para un determinado nivel de concentración  $C$ .  $I_0$  es el nivel previo del impacto a una concentración  $C_0$ .  $C$  y  $C_0$  son los niveles de concentración final y previa, respectivamente.  $\beta$  es el factor de riesgo para la salud (tasa de incremento de riesgo relativo); cambio (%) en el impacto sobre la salud en función del incremento en la concentración de un determinado contaminante.

Por otro lado, Spadaro (2011) apunta que  $C$  es función de la distancia en la dirección del viento a partir de la fuente emisora. Así, la concentración es estimada a partir de modelos de dispersión atmosférica. Dichos modelos son distintos en cuanto a complejidad, a su vez pueden incluir una serie de características atmosféricas<sup>63</sup> y además son, en todo caso, aplicables a escala local y regional. A escala local (<50 km a partir de la fuente emisora) se suelen aplicar modelos gaussianos estacionarios<sup>64</sup>. El corolario de dichos modelos es que un contaminante, una vez emitido a la atmósfera, presentaría niveles de concentración cuyo comportamiento podría ser representado

<sup>61</sup>Spadaro (2011) señala que en el caso del SO<sub>2</sub>, por ejemplo, la tasa de transformación química hacia sus especies secundarias es del 1% por hora.

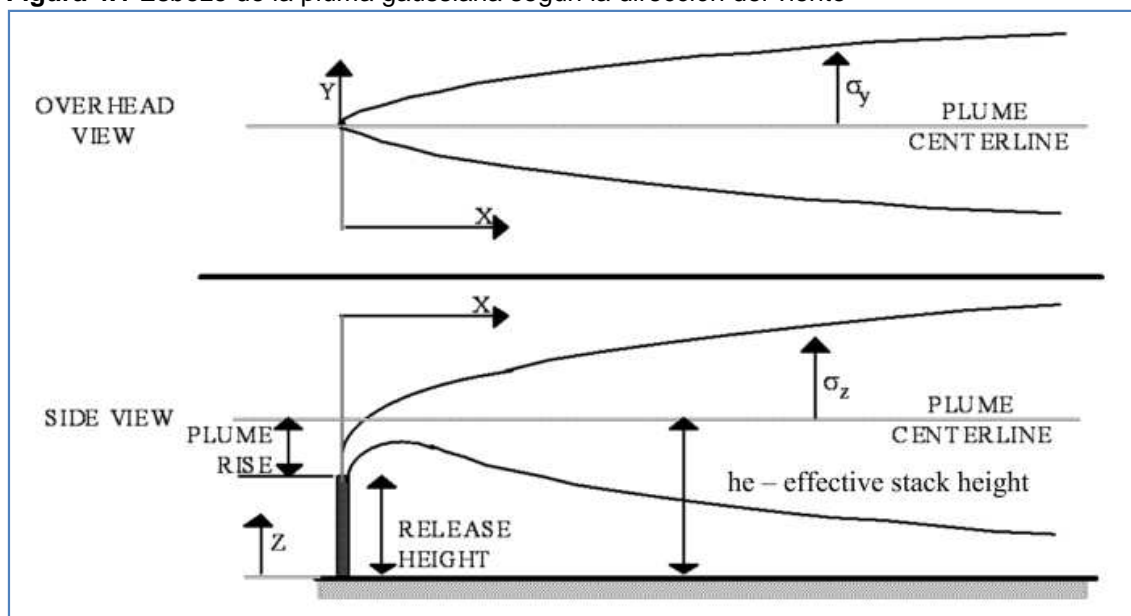
<sup>62</sup>Una partícula fina (PM<sub>2,5</sub>) permanece más tiempo en la atmósfera con relación a una partícula gruesa (PM<sub>10</sub>).

<sup>63</sup>Spadaro (2011) señala que algunas de las características atmosféricas que un modelo de dispersión podría incluir son: dispersión tridimensional (horizontal y vertical), dependencia del tiempo y transformaciones químicas.

<sup>64</sup>Un ejemplo de modelo gaussiano estacionario es el Industrial Source Complex Model (ISC). Dicho modelo es muy eficaz para medir concentraciones anuales o de largo plazo, más que para eventos puntuales.

según dos distribuciones normales independientes. Otro aspecto es que cuando la pluma se eleva a través de la atmósfera, la misma se extiende según la distancia horizontal ( $x$ ; *downwind*) o vertical ( $y$ ; *crosswind*), causadas por el flujo turbulento. En la Figura 4.1 se representa el comportamiento de la pluma gaussiana. Es conveniente resaltar que, a escala local, la remoción de los contaminantes a partir de deposición húmeda y seca, así como las transformaciones químicas no suelen ser una variable relevante.

**Figura 4.1** Esbozo de la pluma gaussiana según la dirección del viento



Fuente: Spadaro (2011)

No obstante, a escala regional (más allá de 50 km a partir de la fuente emisora) los aspectos relacionados con la dispersión y transformación química no pueden ser despreciados y, por eso, resulta fundamental incorporar modelos más complejos, que a su vez sean capaces de captar los cambios en las condiciones climáticas y las alteraciones en tiempo y espacio<sup>65</sup>. Hay una serie de modelos de transporte de largo alcance creados con el objetivo de estimar la concentración de contaminantes a escala regional. Spadaro (2011) menciona el WTP<sup>66</sup>, EMEP<sup>67</sup> y el CALPUFF<sup>68</sup> como los más conocidos.

<sup>65</sup> Algunos efectos como una tormenta pueden lavar y arrastrar gran parte de los contaminantes presentes en la pluma. Por otro lado, el  $\text{NO}_x$  es muy sensible a la temperatura, luz solar y a la presencia de otros compuestos (ej. amoníaco).

<sup>66</sup> El WTM (Windrose Trajectory Model) ha sido el modelo aplicado en el proyecto ExternE.

<sup>67</sup> El EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) es el modelo oficial usado en la Unión Europea en lo que se refiere a la adopción de políticas públicas asociadas con la contaminación transfronteriza. Disponible en <http://www.emep.int/> (consulta realizada el 16 de febrero de 2012).

<sup>68</sup> El CALPUFF es un modelo lagrangiano de nubes aisladas desarrollado por la EPA (US Environmental Protection Agency). Disponible en [http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion\\_prefrec.htm#calpuff](http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#calpuff) (consulta realizada el 16 de febrero de 2012).

Habida cuenta de que  $I$  es el incremento total del impacto ( $I - I_0$ ) en función de una tasa de emisión  $Q$ , se puede reescribir la Ecuación 4-1 en los siguientes términos:

$$\Delta I = \sum_j (I - I_0) \approx \sum_j I_0 \beta (C - C_0)$$

*Ecuación 4-2*

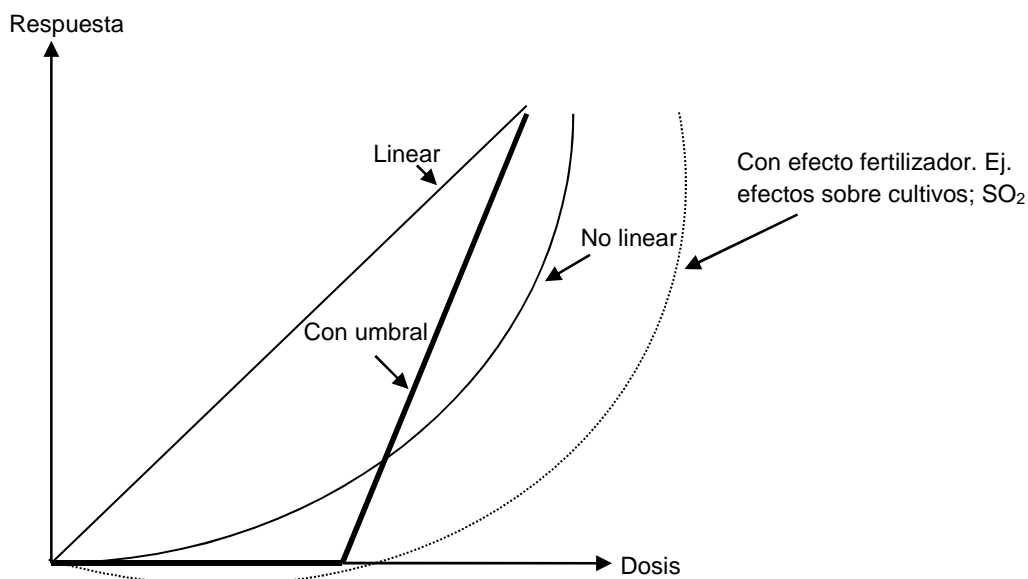
$$\Delta I \approx \sum_j \left[ \frac{I_0 \cdot \beta}{Pob} \right]_j \cdot \Delta C_j \cdot Pob_j = \sum_j S_{CRj} \cdot \Delta C_j \cdot Pob_j = S_{CR} \cdot \sum_j \Delta C_j$$

*Ecuación 4-3*

$\Delta I$  es el incremento total del impacto sumado según la distribución geográfica de la población;  $Pob_j$ ,  $I_0$  es el nivel previo del impacto ponderado según la población (casos por año verificados a un nivel de concentración  $C_0$  entre la población en riesgo).  $\Delta C_j$  es el incremento de la contaminación, por encima del nivel previo  $C_0$ , debido a una emisión  $Q$  en una determinada localización  $j$ .  $S_{CR}$  es la pendiente de la función concentración-respuesta que mide el incremento en la cantidad de casos/eventos por año por unidad de concentración. Del análisis de la Ecuación 4-3 se puede observar que la función concentración-respuesta tiene un valor constante a lo largo de la zona de impacto para cualquier incremento de la concentración por encima del nivel previo, suponiendo de esta manera que la pendiente ( $S_{CR}$ ) no es una función de la concentración  $C_j$ . Además, para concentraciones observadas en países desarrollados, los estudios epidemiológicos señalan que las CRF son funciones lineales sin umbrales, lo que significa decir que asumen valores nulos a un nivel cero de concentración (véase Gráfico 4.1)<sup>69</sup>.

<sup>69</sup> Nota del codirector Dr. Joseph V. Spadaro: El supuesto de que las CRF son funciones lineales sin umbral son el resultado de estudios desarrollados en países de occidente donde las concentraciones previas son bajas. No obstante, en el caso de India, China y posiblemente en Brasil, dicho supuesto podría no reflejar la realidad. En cualquier caso, dicho factor causaría una sobrestimación de los resultados.

**Gráfico 4.1** Características de las CRF (en contexto de concentraciones de bajas)



Fuente: Elaboración propia a partir de Spadaro (1999)

Por último, para homogeneizar el impacto en términos monetarios se establece un coste unitario;  $U_{\text{coste}}$  (coste de cada caso de bronquitis, por ejemplo) para cada aspecto de salud analizado. Dicho coste puede venir dado por el coste directo asociado con una enfermedad (coste de un ingreso hospitalario), por la disposición a pagar para evitar sufrir una determinada enfermedad o bien por los costes de oportunidad (días de actividad restringidas, días de trabajo perdidos etc.). De esta forma, al incorporar el coste unitario ( $U_{\text{coste}}$ ) en la Ecuación 4-3, representaríamos el daño total ( $D$ ) por año mediante la ecuación de abajo.  $D_i$  es el coste del daño (coste por año) para un determinado aspecto de salud  $i$ .

$$D = \sum_i D_i = \sum_i [S_{CR} \cdot U_{\text{coste}} \cdot \sum_j \Delta C_j \cdot Pobj_j]$$

*Ecuación 4-4*

La Ecuación 4-4 modela el impacto bajo unas condiciones simplificadas solamente para la  $S_{CR}$ . Para una concentración continua y en función de una determinada distribución poblacional, la suma presente en la Ecuación 4-4 es sustituida por la integral de superficie (véase Ecuación 4-5) que cubre la zona de impacto del análisis (aproximadamente a más de 1.000 km de la fuente generadora).

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \left[ S_{CR} \cdot U_{coste} \int_{\text{zona de impacto}} \Delta C(Q_p, \bar{r}) p(\bar{r}) d\bar{r} \right]$$

Ecuación 4-5

$\Delta C$  es el incremento en la concentración previa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de un determinado contaminante primario o secundario<sup>70</sup> debido a una tasa de emisión de un contaminante primario  $Q_p$  ( $\mu\text{g}/\text{s}$ ), en una determinada localización  $\bar{r}$  y según la densidad poblacional del receptor (personas por  $\text{m}^2$ ). Resulta oportuno observar que las distribuciones poblacionales a nivel local y regional son distintas pero en el SUWM se asume que las personas se distribuyen uniformemente entre sus respectivos territorios. De esta manera:

$$p(\bar{r}) = p_{ef} = \left[ f_{loc} \left( \frac{p_{loc}}{p_{reg}} \right) + (1 - f_{loc}) \right] p_{reg}$$

Ecuación 4-6

$f_{loc}$  es la participación local sobre el impacto total medido por el UWM. Para las partículas dicha distribución ( $f_{loc}$ ) suele variar entre un 5% y 20%, siendo un 15% el valor más común (Spadaro, 2011).  $p_{loc}$  y  $p_{reg}$  son las distribuciones poblacionales a nivel local (<50km) y regional, respectivamente. Juntas, ambas variables definen una media ponderada ( $p_{ef}$ ).

Con el objetivo de abarcar un 95% del daño total, el UWM tiene en cuenta una zona de impacto circular con radio de 500km (cerca de una gran ciudad) y 1.000km cuando la fuente se localice en una zona rural. Por otro lado, cuando se trata de los contaminantes secundarios la zona de impacto se extiende entre 1.000 y 1.500km, independientemente de la localización de la central o características de la fuente (ej. altura de la chimenea). A nivel local, el viento transporta los contaminantes más allá de la localización de la fuente, haciendo que sean formados los contaminantes secundarios a partir de reacciones químicas con otros compuestos presentes en la atmósfera. De esta manera, los impactos también se producen a kilómetros de distancia de la fuente.

<sup>70</sup> Nótese que los contaminantes secundarios se forman a partir de la emisión de su precursor primario. De esta forma,  $Q_p$  es la tasa de emisión del contaminante primario.

$$M(Q_p, \bar{r}) = k \times \Delta C(Q_p, \bar{r})$$

Ecuación 4-7

En una determinada localización  $\bar{r}$ , en el plano horizontal a nivel del suelo, la tasa de remoción del flujo de los contaminantes  $M(Q_p, \bar{r})$  y  $\Delta C(Q_p, \bar{r})$  es constante.  $M(Q_p, \bar{r})$  viene dada por  $\mu\text{g/s}$  por unidad de área de superficie ( $\text{m}^2$ ). Para los contaminantes primarios, la constante de proporcionalidad  $k$  se refiere a la remoción de los contaminantes o *depletion velocity*.  $k$  tiene unidades en  $\text{m/s}$  y abarca todas las vías de remoción que incluyen las deposiciones seca y húmeda, transformaciones químicas y desintegración radioactiva. Para los contaminantes secundarios,  $k$  es una efectiva *depletion velocity*. La misma es obtenida por el producto entre las velocidades de remoción primaria y secundaria dividido por la velocidad de transformación *primario-a-secundario* (velocidad de transformación de los contaminantes primarios en secundarios), que vincula de esta manera la formación de un determinado contaminante secundario con la correspondiente tasa de emisión del contaminante primario  $Q_p$  (Spadaro, 1999; 2011).

En este sentido, introduciendo la Ecuación 4-6 y la Ecuación 4-7 en la Ecuación 4-5 y teniendo en cuenta que la integral de superficie del flujo de remoción de los contaminantes es equivalente a la tasa de emisión de la fuente a partir de la conservación de la masa en estado estacionario, alcanzamos la estimación básica del daño  $D_{UWM}$  para una determinada tasa de emisión  $Q_p$  (coste anual del daño, agregado entre todos los aspectos de salud  $i$ ). La relación  $D_{UWM}/Q_p$  es el coste marginal del daño (coste por  $\text{kg}$  de emisión).

$$D_{UWM} = \left( \frac{Q_p \cdot \rho_{ef}}{k} \right) \cdot \sum_i [S_{CR,i} \cdot U_{coste,i}]$$

Ecuación 4-8

$$d_{UWM} = \frac{D_{UWM}}{Q_p} = \left( \frac{\rho_{ef}}{k} \right) \cdot \sum_i [S_{CR,i} \cdot U_{coste,i}]$$

Ecuación 4-9

Las ecuaciones 4.8 y 4.9 son las ecuaciones generales del SUWM.  $D_{UWM}$  es el daño total estimado por la ecuación raíz del UWM.  $\rho$  es la densidad poblacional (personas/ $\text{km}^2$ ) de la región incluida en la llamada “zona de dominio del impacto”, que



resulta ser una ponderación entre la densidad a nivel local y regional.  $S_{CR}$  es la pendiente de la función concentración-respuesta que establece la correlación entre los niveles de concentración de contaminantes y los efectos sobre el receptor. Tal y como se ha mencionado antes, las funciones concentración-respuesta asociadas con los impactos sobre la salud son funciones lineales sin umbrales determinados, siendo la concentración una variable independiente. Dichas funciones son el resultado de estudios epidemiológicos que demostraron una estrecha relación entre los efectos sobre la salud humana y un aumento de la contaminación.

Los costes unitarios ( $U_{coste}$ ) son valores monetarios asociados con cada aspecto de salud. Es decir, se trata de una medida de conversión que transforma la cantidad de casos (ej. casos de asma) en un valor monetario. Para ello, además del proyecto ExternE, una serie de estudios han estimado los costes para cada aspecto sanitario, como, por ejemplo, el coste de un caso de bronquitis, asma, mortalidad (YOLL<sup>71</sup>), etc. El establecimiento de un valor monetario es una condición indispensable a la hora de homogeneizar, bajo una sola unidad, todos los impactos generados por la fuente contaminante<sup>72</sup>.

Otro dato relevante para el modelo es la velocidad de remoción de los contaminantes o *Depletion Velocity* ( $k$ ). La  $k$  es la velocidad por la cual los contaminantes son removidos de la atmósfera debido a las transformaciones químicas y a la deposición seca y húmeda. Spadaro (1999) ha estimado valores de la  $k$  teniendo en cuenta las distintas regiones del globo y para los contaminantes primarios: partículas (PM), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y aquellos llamados secundarios: sulfatos y nitratos. Además, conviene resaltar que el UWM también valora los impactos de otros compuestos como el amoníaco y metales pesados. La  $k$  se ve muy influenciada por las condiciones pluviométricas, donde, por ejemplo, la  $k$  para las partículas ( $PM_{10}$ ) estimada para la Amazonia (Brasil) asume valores de aproximadamente 2,9 cm/s en cuanto que para el sur de Brasil la misma sería de 1,3 cm/s.

Por último, la  $Q_p$  es la tasa de emisión de un contaminante verificado para una determinada fuente y viene expresada en  $\mu g/s$ . De esta forma, el modelo permite

---

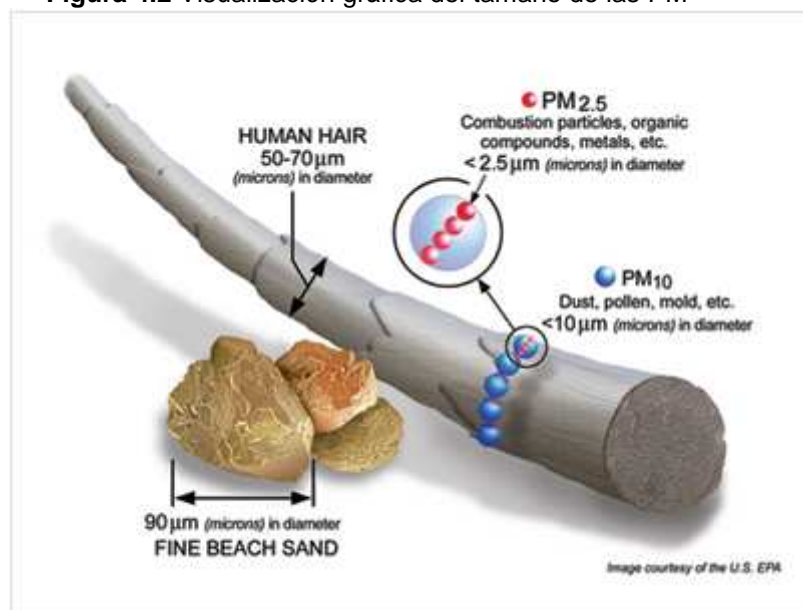
<sup>71</sup>Years of Life Lost (Años de Vida Perdidos).

<sup>72</sup> Conviene resaltar que valoración económica llevada a cabo a través de los costes unitarios es solo una forma de abordar los daños. Los mismos pueden ser abordados, por ejemplo, bajo otras perspectivas como los QALY y DALY.

calcular los daños asociados con los siguientes contaminantes: partículas (PM, en adelante), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO) y contaminantes secundarios tales como nitratos y sulfatos. Los contaminantes primarios son aquellos emitidos directamente por la central y son muy sensibles a las condiciones atmosféricas locales, particularmente a la velocidad y dirección del viento. Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera debido a reacciones químicas entre los contaminantes primarios y otros compuestos existentes en la atmósfera. Los contaminantes secundarios son poco sensibles a escala local, debido a que tales reacciones suelen ocurrir a decenas de kilómetros de distancia de la fuente emisora. Los precursores de los sulfatos y nitratos son el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_x$ , respectivamente.

Las PM son las partículas microscópicas sólidas o líquidas que se encuentran suspendas en el aire y que pueden ser generadas por fuentes naturales (el polen, por ejemplo) o artificiales (acción antropogénica), siendo esta última la principal responsable de la contaminación atmosférica. La caracterización de las PM varía según su tamaño, siendo las finas ( $\text{PM}_{2,5}$ ) y las coarse ( $\text{PM}_{10-2,5}$ ) las más comunes. Las  $\text{PM}_{10-2,5}$  tienen un tamaño entre 10-2,5 $\mu\text{m}$ , pudiendo penetrar hasta las vías respiratorias bajas. Las  $\text{PM}_{2,5}$  son las llamadas partículas “respirables”, cuyo tamaño es inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ , su penetración puede alcanzar las zonas de intercambio de gases del pulmón siendo, por lo tanto, las más peligrosas para la salud humana. La Figura 4.2 nos permite tener una idea del tamaño de las partículas, puesto que ofrece una visualización gráfica que compara el tamaño de las mismas con un grano de arena o con un hilo de pelo humano.

**Figura 4.2** Visualización gráfica del tamaño de las PM



Fuente: USEPA<sup>73</sup>

Ahora bien, la Ecuación 4-8 y la Ecuación 4-9 son las versiones básicas del UWM. En la Ecuación 4-10, dichas ecuaciones (4.8 o 4.9) han sido modificadas incorporando dos multiplicadores:  $S_{sh}$ ;  $S_{ct} \cdot S_{sh}$  es un factor que sirve para mejorar la eficacia del UWM ( $D^+_{UWM}$ ) al tener en cuenta la altura de chimenea y la localización de la fuente. Es decir, a partir de este factor se puede incrementar la precisión del UWM puesto que se permite tener en cuenta las diferencias que existen entre una gran ciudad o pequeña; entre una zona rural o urbana o entre la altura de la chimenea (alta o baja). El parámetro  $S_{ct}$  es un factor que tiene en cuenta las no-linealidades en las transformaciones químicas, principalmente aquellas derivadas de las emisiones de los óxidos de nitrógeno<sup>74</sup> (Spadaro, 2011). Spadaro (2011) recomienda los valores para los parámetros  $S_{sh}$  y  $S_{ct}$  en función de cada caso que se quiera estudiar. La

<sup>73</sup> United States Environmental Protection Agency (USEPA). Disponible en: <http://www.epa.gov/ord/ca/quick-finder/particulate-matter.htm> (consulta realiza el 16 de mayo de 2012)

<sup>74</sup> El nitrógeno y el azufre compiten entre ambos por el amoníaco presente en la atmósfera para neutralizar el ácido nítrico y sulfúrico. No obstante, el amoníaco neutraliza preferentemente los sulfatos en vez de los nitratos. Además, a diferencia de los sulfatos, la formación de los nitratos es reversible; el equilibrio entre ácido nítrico, nitrato de amonio y amoníaco puede variar dependiendo de la disponibilidad del amoníaco y de la temperatura ambiente. Durante los meses de verano, por ejemplo, las altas temperaturas limitan considerablemente la formación de nitratos. Así, para emisiones no-marginales de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) el factor  $S_{ct}$  asume valores entre 0,25 y 0,5 (Spadaro, 2011). Para los otros contaminantes y emisiones marginales de  $NO_x$ , por lo general, un cambio en las concentraciones previas de amoníaco no produce efectos apreciables en las concentraciones de los demás contaminantes, así  $S_{ct}$  asume el valor de 1,0.

elección de dichos parámetros dependerá de las características de la fuente, su localización y proximidad a grandes centros poblacionales. En la Tabla 4.1, se presentan dichos parámetros.

$$D^+_{UWM} = S_{sh} \times S_{ct} \times D_{UWM} = S_{sh} S_{ct} \left( \frac{Q_p \cdot \rho_{ef}}{k} \right) \sum_i [S_{CR,i} \cdot U_{coste,i}]$$

Ecuación 4-10

**Tabla 4.1** Valores recomendados para los parámetros  $S_{sh}$  y  $S_{ct}$

Contaminante	Características del sitio	$S_{sh}$	$S_{ct}$
<b>PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub></b>	Zona rural, $\left(\frac{p_{loc}}{p_{reg}}\right) < 2$	1,5 para hs = 25m 0,9 para hs = 225m 2 para transporte	1
	Ciudad pequeña, $\left(\frac{p_{loc}}{p_{reg}}\right) < 6$	1,3 para hs = 25m 0,8 para hs = 225m 10-15 transporte	
	Ciudad mediana, $\left(\frac{p_{loc}}{p_{reg}}\right) < 10$	1,4 para hs = 25m 0,7 para hs = 225m 20-40 transporte	
	Ciudad grande, $\left(\frac{p_{loc}}{p_{reg}}\right) > 10$	1,6 para hs = 25m 0,6 para hs = 225m hasta 100 para transporte	
<b>Sulfatos</b>	-	+/- 30% Poca dependencia de la altura de la chimenea y localización de la fuente	1
<b>Nitratos</b>	-	+/- 40% Poca dependencia de la altura de la chimenea y localización de la fuente	Para emisiones no-marginales: 0,25 -0,5 (0,25, recomendado)  Para emisiones marginales ≈ 1

Fuente: Spadaro (2011)

Las ecuaciones 4.8 y 4.9 (SUWM) son más apropiadas para estimar los impactos a nivel regional-país, mientras que la Ecuación 4-10 es más eficaz para medir daños causados por fuentes y locales específicos. En este último caso, Spadaro (2011) señala que a nivel local el daño total explicaría entre un 5-20% para las partículas (PM). No obstante, cuando la fuente emisora esté localizada próxima a grandes centros poblacionales los efectos relacionados con los contaminantes primarios (ej. partículas) suelen explicar más de un 75% del daño (Spadaro, 1999), dependiendo de altura de chimenea.

#### 4.2.2.2. El Robust Uniform World Model (RUWM)

El RUWM incrementa los resultados del SUWM al tener en cuenta las distribuciones de la población local, datos meteorológicos locales y los parámetros de la fuente emisora, fundamentalmente la altura efectiva de la chimenea (véase Figura 4.1 ). De esta forma, el incremento de la versión básica del SUWM mencionada en el apartado anterior (Ecuación 4-8), viene dada por la siguiente ecuación:

$$D_{UWM} = \left( \frac{Q_p \cdot \rho}{k} \right) \cdot \sum_i [S_{CR} \cdot U_{coste}] \cdot R_{RUWM}$$

Ecuación 4-11

Nótese que la Ecuación 4-12 es la ecuación básica del SUWM a diferencia de que incorporara el factor  $R_{RUWM}$  que es el factor que promueve la transición del SUWM al RUWM introduciendo de esta manera los supuestos mencionados en el párrafo anterior. A su vez,  $R_{RUWM}$  viene dado por la siguiente relación:

$$R_{RUWM} = \left( \frac{\rho_L}{\rho} \right) \left( \frac{\sqrt{2k}}{\sqrt{\pi u}} \right) \int_0^{R_0} \frac{1}{\sigma_z} \exp \left( -\frac{h_e^2}{2\sigma_z^2} \right) dr + \exp \left( -\frac{k R_0}{u h_{mix}} \right)$$

Ecuación 4-12

Según lo expuesto más arriba, cuando el objetivo sea utilizar el RUWM,  $R_{RUWM}$  asumiría la configuración mencionada en la Ecuación 4-12.  $\rho_L$  es densidad de la población a nivel local.  $u$  es la velocidad media del viento a la altura de la chimenea.  $h_{mix}$  es la altura de la capa de mezcla<sup>75</sup>.  $R_0$  es el radio del dominio local (50km).

<sup>75</sup>La  $h_{mix}$  es la parte de la atmósfera donde ocurren gran parte de las mezclas turbulentas. La forma de calcular la  $h_{mix}$  será expuesta en el capítulo 3.

$h_e$  es la altura efectiva de la chimenea de la fuente emisora<sup>76</sup>.  $\sigma_z$  es el coeficiente de difusión vertical que es función de la distancia a favor del viento, clases de estabilidad de Pasquill y ubicación de la fuente (rural o urbana).

Nótese que cuando la distribución del receptor es uniforme;  $R_{RUWM} = 1$ , (véase Ecuación 4-12), estaríamos hablando entonces del SUWM.

#### 4.2.3. Validación del SUWM

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, el UWM, a pesar de ser una metodología simplificada en lo que se refiere a la demanda de datos, presenta resultados muy similares a los alcanzados en IPA (Metodologías de las Vías de Impacto) que son más complejas. En este sentido, para corroborar este hecho se presentará en este apartado un análisis de los resultados del UWM con otros modelos Spadaro (2011)<sup>77</sup>. En los apartados que siguen presentaremos tres de estas comparaciones entre el UWM y los proyectos/modelos NEEDS, CAFE y EC4MACS.

Asimismo, se resumen los principales resultados relacionados con las comparaciones entre el UWM y los distintos modelos en cuestión.

##### 4.2.3.1. SUWM vs. NEEDS

Como se puede observar en el Gráfico 4.2, la estimación de las externalidades de la energía (coste por kg del contaminante;  $PM_{2.5}$ ) propiciada por el UWM retorna valores muy parecidos al NEEDS. Conviene resaltar que ambos modelos estudiaron las externalidades para los países de la Unión Europea. Este último proyecto encontró un coste externo por kg de  $PM_{2.5}$  emitida a la atmósfera de 24,4 euros, mientras que el UWM propició una estimación de 25,7 euros, representando una diferencia de solamente un 5%. En ambos casos, los costes estimados son el promedio entre las estimaciones encontradas para los países de la UE. Por otro lado, la más elevada sobrestimación con respecto al NEEDS no llega a superar un 26% de diferencia. Cuando se trata del punto de más baja subestimación, dicho valor no alcanza un 21%.

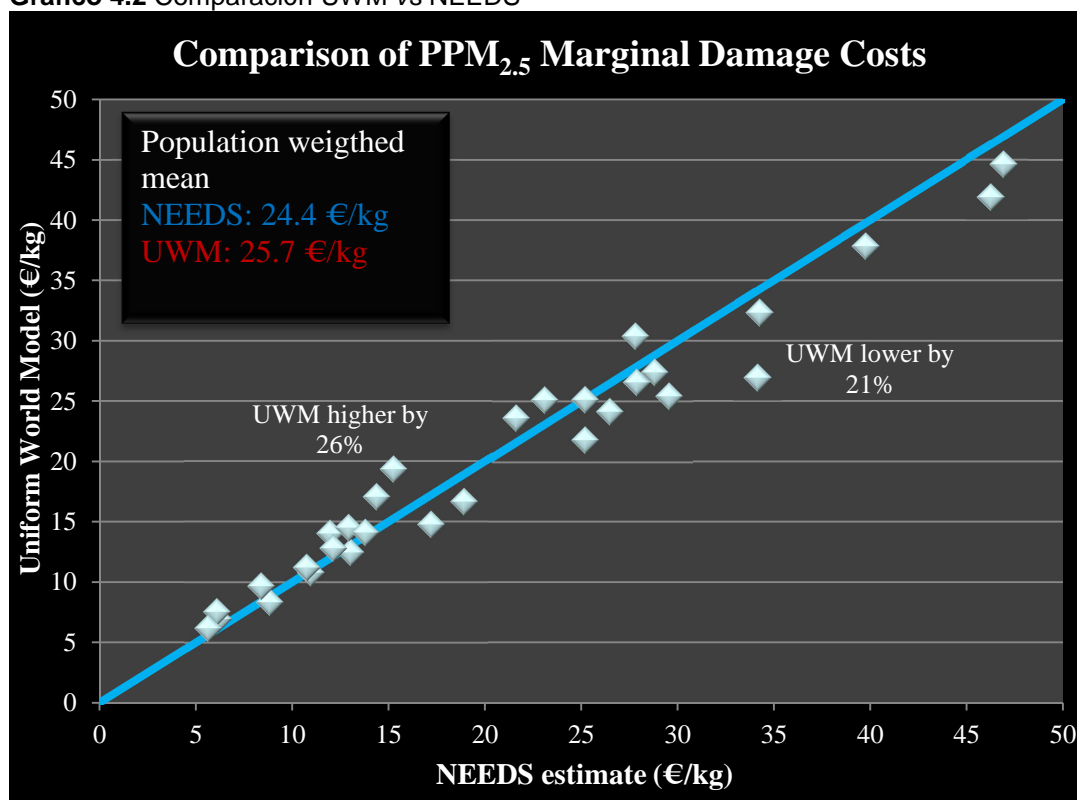
---

<sup>76</sup>Altura de la chimenea sumada con la elevación de la pluma.

<sup>77</sup>Estimaciones realizadas por el Dr. Joseph V. Spadaro durante la realización del curso "Methodology of impacts and damage costs of pollution" (París, agosto y septiembre de 2010). Los resultados forman parte de la metodología del UWM (Spadaro, J.V., Uniform World Model, UWM, Methodology) [Joseph.Spadaro@aol.com](mailto:Joseph.Spadaro@aol.com) (trabajo científico en trámite de publicación).

De esta manera, podemos observar que ambos modelos presentan resultados bastante coherentes, aun cuando existen diferentes formas de abordar la valoración de los daños sobre la salud humana.

**Gráfico 4.2** Comparación UWM vs NEEDS



Fuente: Spadaro, J.V., Uniform World Model, UWM, Methodology (2011)

#### 4.2.3.2. UWM vs. CAFE

Las estimaciones realizadas por Spadaro (2010) entre los resultados del UWM y el CAFE también han demostrado resultados con aceptables márgenes de error. La comparativa utiliza las emisiones de PM<sub>2.5</sub> como contaminante y la mortalidad crónica como aspecto sanitario. Conviene resaltar que aplica el valor de un año de vida perdido (VOLY) para la valoración monetaria como enfoque preferido. En este sentido, el coste externo total encontrado por el UWM fue de 27.260 euros por tonelada (€/t) en cuanto que el CAFE estimó dicho impacto en 26.000 €/t. De esta manera, la diferencia entre UWM y el CAFE no supera un 5%. Por otro lado, Spadaro (2010) también comparó los resultados en el caso de que se aplicara el número de muertes prematuras (nº de muertes prematuras multiplicado por el VSL). En este caso, el CAFE estima los efectos sobre la mortalidad (exposición a PM<sub>2.5</sub>) en 40.000 €/t

mientras que el UWM la estima en 44.800 €/t; un 12% superior. Una vez más, se observa que ambos modelos presentan resultados muy equilibrados.

Con relación a los efectos del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) sobre la mortalidad, el promedio de los valores estimados por el UWM (Unión Europea) es un 26% más elevado respecto al CAFE.

#### 4.2.3.3. *UWM vs EC4MACS*

Spadaro (2011) ha realizado también una comparación del UWM con el proyecto EC4MACS<sup>78</sup> de la Unión Europea. Este proyecto tiene por objetivo crear un consorcio de instituciones con la finalidad de construir y mantener una sólida red de modelos dirigidos a una evaluación integrada de la eficacia de las políticas de control de emisión de contaminantes y gases de efecto invernadero.

La comparación entre ambos se hizo mediante el análisis de los impactos indirectos producidos por las emisiones de amoníaco en Europa. Para ello, Spadaro (2011) utilizó el UWM para estimar las consecuencias indirectas de las emisiones de amoníaco causadas principalmente por la exposición a partículas finas secundarias<sup>79</sup> (partículas totales suspendidas y PM<sub>2,5</sub>). Las funciones concentración-respuesta utilizadas fueron: mortalidad crónica e infantil, bronquitis crónica, días de trabajo perdidos, ingresos hospitalarios (respiratorios y cardíacos), síntomas del tracto respiratorio inferior (adultos y niños) y uso de broncodilatadores (adultos y niños).

Los resultados de las comparaciones presentadas por Spadaro (2011) demuestran que para muchos países las desviaciones entre ambos modelos son de aproximadamente un 30%, pero la dispersión residual es elevada si se compara con las emisiones de partículas finas primarias. Según Spadaro (2011), dicha dispersión refleja la variabilidad geográfica en términos de las tasas de transformación química. Por otro lado, Spadaro (2011) apunta que a nivel europeo global el UWM sobrestima el impacto en un 7,5%; un resultado satisfactorio según este autor debido a las mencionadas complejidades en las transformaciones químicas y a la incertidumbre asociada.

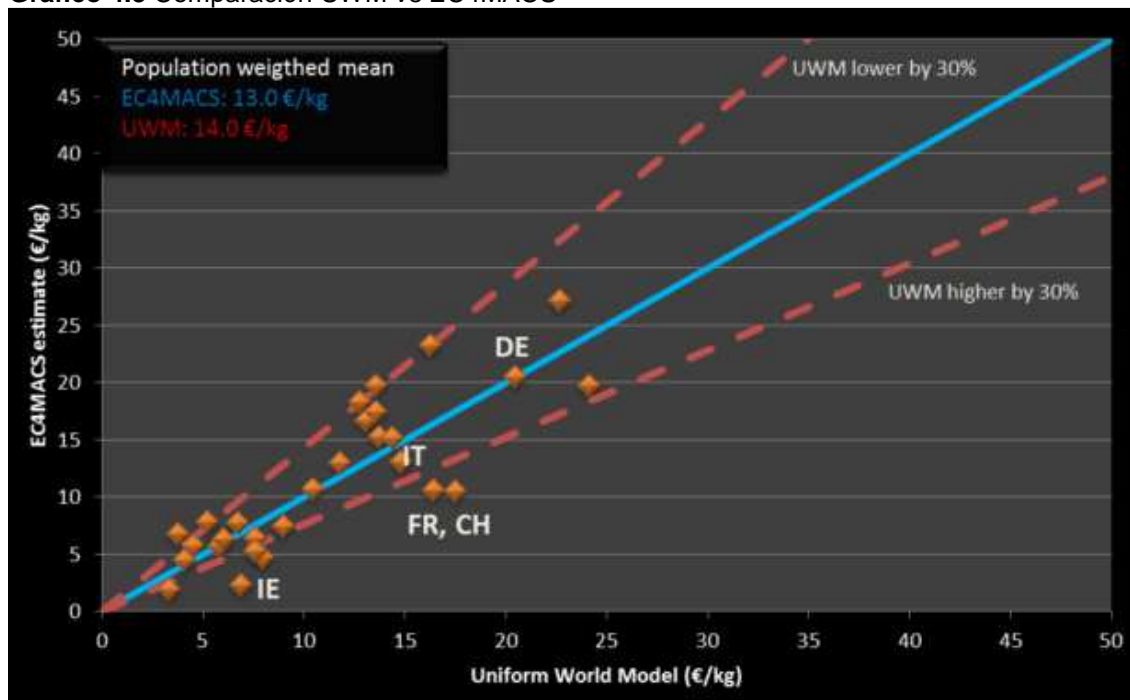
---

<sup>78</sup>EC4MACS “European Consortium for Modelling of Air Pollution and Climate Strategies”. Se trata de un proyecto financiado por el EU-LIFE program: <http://www.ec4macs.eu/home/index.html?sb=1> (consulta realizada el 17 de febrero de 2012).

<sup>79</sup>Las partículas una vez emitidas a la atmósfera pueden formar componentes secundarios como consecuencia de reacciones químicas con otros componentes presentes en la atmósfera.



**Gráfico 4.3** Comparación UWM vs EC4MACS



Fuente: Spadaro (2011)

IE: Irlanda;FR:Francia;CH:Suiza;IT:Italia;DE:Alemania

#### 4.3. Tratamiento de los datos (*input*) requeridos por el UWM

En el apartado anterior ha expuesto los aspectos metodológicos del UWM. A partir de este momento, trataremos cada uno de los requerimientos del modelo que serán necesarios para el estudio de las externalidades causadas por la central termoeléctrica de Candiota. Dichos requerimientos son los datos de entrada para la ejecución del modelo y han sido presentados en las ecuaciones del modelo expuestas en el apartado anterior.

Una vez conocida la realidad económica, social y medioambiental de la región, se dará inicio al estudio de los impactos sobre la salud humana generados por la central de Candiota. Para ello, de cara a la estimación de los impactos sobre la salud humana, es de extrema relevancia conocer los datos de entrada relacionados con el caso de estudio y que serán requeridos por el UWM (Spadaro, 1999)<sup>80</sup>. Tal y como se ha dicho en el capítulo dos, el UWM en su vertiente robusta (RUWM) se presenta como una buena alternativa para estudiar los impactos asociados con una fuente emisora específica. Por este motivo, se elige el RUWM para el estudio del caso de

<sup>80</sup>Spadaro, J. V. (1999): "Quantifying the Damages of Airborne Pollution: Impact Models, Sensitivity Analyses and Applications", Ph.D. Dissertation, Ecole des Mines de Paris, Centre d'Energétique, 60 boul. St. Michel, F75272, Paris, Cedex 06, France.

Candiota habida cuenta de que esta versión proporcionará una explicación más amplia de los impactos, tanto a nivel local como regional. Bien es cierto que, según las estimaciones realizadas por Spadaro (1999, 2011), cuando se trata de una central ubicada en una zona rural (distante de grandes centros poblacionales) los impactos relacionados con los contaminantes secundarios suelen ser más representativos y, por ende, a nivel regional suelen explicar más de un 75% del daño para los contaminantes primarios y por encima de este valor para los contaminantes secundarios. En estos casos, cuando se busque una valoración rápida y a su vez eficaz, se podrá utilizar la versión simplificada del UWM (SUWM) puesto que, como hemos mencionado, las características del caso harían que la mayor parte del impacto se produjese a escala regional. No obstante, cuando dicha fuente esté ubicada en una zona rural y cuando el objetivo del analista sea ofrecer un análisis exhaustivo de una fuente específica (*Bottom-up*), la versión robusta (RUWM) se presentaría como el método más eficaz habida cuenta de que explicaría mejor el impacto a nivel local, pese a que dicho monto no sería elevado (aproximadamente entre 5-20%). Como se ha podido comprobar, la elección del tipo de modelo dependerá sobre todo del objetivo que se quiera alcanzar con la investigación y del tipo de política que se quiera acometer. Por ejemplo, si el objetivo es disponer de un análisis global del daño (*Top-down*) para una futura incorporación en un proceso de toma de decisiones sobre qué tipo de matriz elegir o cuando se desconozca la localización de la fuente. Por otro lado, cuando el objetivo sea un análisis pormenorizado del impacto y sus efectos sobre una determinada zona (local), o bien cuando el analista decida estudiar un emplazamiento para determinar las medidas de control, el RUWM se presentaría como la alternativa más eficaz dado que explicaría mejor el daño en ambos sentidos (local y regional). No obstante, este aspecto (variabilidad de los resultados según la localización de una central) será tratado en el análisis de sensibilidad.

De esta manera, el UWM en su versión robusta (RUWM) requerirá cinco grandes bloques de datos. El primer bloque abarca las características técnicas de la central, el inventario de contaminantes y la *Depletion Velocity*. El segundo hace referencia a la distribución de la población a escala local y regional. El tercer bloque lo constituyen las funciones concentración-respuesta. Asociado al aspecto anterior, el cuarto grupo de datos lo forman los valores monetarios asociados a cada aspecto sanitario estudiado en las funciones anteriores. El quinto y último aspecto son los datos meteorológicos de la región. En la Figura 4.3 se ilustran los cinco grandes bloques de datos necesarios para la correcta ejecución del modelo.

**Figura 4.3** Datos requeridos por UWM



Fuente: Elaboración propia

En los apartados que siguen, se pasará a analizar cada uno de estos bloques de datos.

#### 4.3.1. *Parámetros de la fuente, emisiones y Depletion Velocity*

##### 4.3.1.1. *Parámetros de la fuente*

Como se ha mencionado anteriormente, la central objeto de este estudio es la central termoeléctrica Presidente Médici, más conocida como “Candiota”. Los detalles técnicos de la central están expuestos en la Tabla 4.2.

Con el objetivo de ajustar los resultados a cada región geográfica del globo, el modelo requiere la localización geográfica de la fuente, es decir, su latitud y longitud. La latitud viene dada en una escala de  $-90^{\circ}$  a  $+90^{\circ}$  grados, asumiendo valores negativos para fuentes ubicadas al sur del ecuador y positivos al norte. La longitud se establece en una escala de 0 a  $360^{\circ}$  grados, contados a partir del occidente del meridiano de Greenwich.

**Tabla 4.2** Detalles técnicos de la central (Datos más recientes disponibles)

<b>Nombre:</b>	Presidente Médici (Candiota Fases A y B)
<b>Ciudad:</b>	Candiota
<b>Estado:</b>	Rio Grande do Sul
<b>Latitud DD :</b>	-31,55
<b>Longitud DD:</b>	53,68
<b>Combustible y consumo:</b>	Carbón bituminoso alto volátil clase C Consumo <sup>(d)</sup> : 1.215.334 toneladas por año Humedad: 16,4% Cenizas: 49,68% Material volátil: 23,10% Carbono fijo: 27,22% Poder calorífico superior (MJ kg <sup>-1</sup> ): 14,32 Contenido en azufre: 0,96% Eficiencia térmica: 20% Generación de energía eléctrica en 2009: 900.410 MWh ( <i>factor de capacidad 23%; 2009</i> )
<b>Emisiones (toneladas/año)</b>	PM <sub>10</sub> = 5.226 t/año SO <sub>2</sub> = 27.654 t/año NO <sub>x</sub> = 3.058 t/año
<b>Potencia (KW):</b>	446.000
<b>Fase A</b>	02 Turbinas: fabricante - Franco Tosi (Italia) 02 Alternadores (2 x 63 MW): fabricante - Asgen (Italia) 02 Caldeiras - fabricante - Ansaldo (Italia)
<b>Fase B</b>	02 Turbinas: fabricante - Alston (Francia) 02 Alternadores (2 x 160 MW): fabricante - Brown-Boveri (Suiza) 02 Calderas: fabricante - Stein Industrie (Francia)
<b>Altura de la chimenea (m)</b>	150
<b>Diámetro de la chimenea (m)</b>	2,0
<b>Velocidad de salida de los gases (m/s)</b>	20,0
<b>Temperatura de salida de los gases (K)</b>	420,0

Fuente: Elaboración propia a partir de:

-CGTEE (<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>) Consulta realizada el 08 de junio de 2011.

-ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica-, SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico-. (<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=544&idPerfil=2>) Consulta realizada el 08 de junio de 2011.

-Nedel, A & Alves RCM, 2003.

CGTEE (2009).

Paralelamente, resulta de fundamental importancia conocer el inventario de contaminantes emitidos por la central. De forma general, estos se dividen en dos

grandes grupos: primarios (PPM) y secundarios (SPM)<sup>81</sup>. Los primarios son aquellos emitidos directamente por la fuente. Los secundarios son los nitratos y sulfatos que se forman mediante reacciones químicas entre los contaminantes primarios con otros compuestos presentes en la atmósfera. También se forman otros compuestos como el ácido nítrico.

En términos de los contaminantes primarios, este estudio tuvo en cuenta los efectos de las partículas ( $PM_{10}$ ; tamaño inferior a 10 micrómetros) y el efecto directo del  $SO_2$ . No se han considerado en este estudio los efectos directos del  $NO_x$  puesto que la literatura (European Commission, 2005) señala que no existen evidencias científicas convincentes que relacionen los efectos sobre la salud humana producidos por este contaminante en su vertiente primaria. Conviene señalar que una mejor comprensión de los efectos de las partículas requeriría un análisis desglosado de las mismas en dos grandes tipos: las coarse ( $PM_{10-2,5}$ ) y las finas ( $PM_{2,5}$ ). Las  $PM_{2,5}$  (partículas finas con tamaño inferior a 2,5 micrómetros) son muy peligrosas para la salud humana puesto que pueden llegar hasta los pulmones. Las  $PM_{10-2,5}$  (partículas coarse con tamaño entre 10 y 2,5 micrómetros) tienen un efecto menor comparadas con las finas, ya que pueden ir más allá de la garganta. De esta forma, cuando hablamos de  $PM_{10}$  se incluyen tanto las coarse como las finas. Un mejor entendimiento de los efectos de estos compuestos requeriría estudiar las partículas en función de su tamaño (finas y coarse), pero haría falta disponer de datos específicos según este desglose. Una alternativa sería estimar el desglose entre finas y coarse según su mezcla en el aire (reparto). Tal y cómo se apreciará en el análisis de sensibilidad (capítulo cinco), dicho reparto en el aire suele ser un 60% finas y 40% coarse.

Para evitar confusiones, conviene aclarar que cuando hablamos del reparto entre finas y coarse mencionado en el párrafo anterior, nos estamos refiriendo a la mezcla en el aire y no a la distribución medida a nivel de la chimenea. Aunque pueda parecer lo mismo, es importante resaltar que se tratan de parámetros diferentes. Este aspecto será de fundamental importancia para comprender uno de los análisis de sensibilidad que será realizado en el siguiente capítulo. Con relación a este último parámetro (distribución finas y coarse a nivel de la chimenea), se estima, por ejemplo, que para Estados Unidos la relación sería de aproximadamente un 80% de partículas finas y un 20% para las coarse (Parkhurst *et al.*, 1999). En Europa dicha relación (a nivel chimenea) la ratio  $PM_{2,5}/PM_{10}$  es de aproximadamente 0,6-0,8, o sea, entre un

---

<sup>81</sup>PPM: Primary Particulate Matter; SPM: Secondary Particulate Matter.

60% y un 80% de las partículas emitidas serían de carácter fino (Querol *et ál.*, 2004). En China (Zhao *et ál.*, 2008 y 2010) dicha relación sería de un 40% finas y un 60% coarse (stack). Como se puede comprobar, la relación puede variar según el sitio donde se realice el estudio, fundamentalmente porque dicha relación se verá influenciada por una serie de factores como por ejemplo la existencia de mecanismos de control (ej. filtros de aire electroestáticos). De hecho, Zhao *et ál.* (2008 y 2010) encontraron que en un determinado sitio donde las centrales dispongan de mecanismos de control como los mencionados arriba, el porcentaje de finas suele ser más alto con relación a las coarse. Esto ocurre porque los filtros retienen la mayor parte de las coarse, pero una buena parte de las finas consigue traspasar dichos filtros, haciendo que en términos proporcionales la concentración de finas sea más elevada con relación a las coarse.

#### 4.3.1.2. Emisiones

De esta forma, debido a que las emisiones de Candiota han sido expresadas en términos de las  $PM_{10}$  y que no se han encontrado evidencias concretas sobre la eventual relación coarse/finas (% sobre  $PM_{10}$ ) para la región estudiada, se optó por tener en cuenta en el análisis la clasificación fundamentada en las  $PM_{10}$  y posteriormente estudiar esta cuestión en el análisis de sensibilidad. En dicho análisis se valorará cómo cambian los impactos en el caso de que se tuviera en cuenta la clasificación en finas y coarse.

Karam *et ál.* (1996) estimaron, haciendo uso de modelos de dispersión, niveles de emisión para la central de Candiota del orden de 711 gramos de  $SO_2$  por segundo. Paz *et ál.* (2007), en un estudio relacionado con la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por la central Candiota, utilizaron las tasas de emisión de 1.000 g/s, 944 g/s y 980 g/s para el  $SO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $NO_x$ , respectivamente<sup>82</sup>.

Los datos oficiales facilitados por la compañía responsable de la central de Candiota (CGTEE) fueron de 119.994, 13.267 y 22.674 toneladas por año para el  $SO_2$ ,  $NO_x$  y  $PM_{10}$ , respectivamente. Cabe resaltar que dichos valores corresponden al pleno funcionamiento de la central (factor de capacidad de 100%) durante todas las horas del año. De esta forma, se hace necesario ajustar dichos valores según el factor de

---

<sup>82</sup>Los valores de emisión utilizados por Paz *et ál.* (2007) tuvieron en cuenta las informaciones facilitadas por la CGTEE (*Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica*). Estos tomaron como base la cantidad diaria de carbón consumido por la central:  $3,02 \times 10^3$  t, con grado de un 2% de azufre.

capacidad de la central<sup>83</sup> (véase Tabla 4.3) hallando así el nivel real de emisiones anuales en toneladas por año.

**Tabla 4.3** Emisiones (t/año), energía eléctrica generada (GWh), potencia instalada (MW) y factor de capacidad (%).

	<b>SO<sub>2</sub></b> (t/año)	<b>NO<sub>x</sub></b> (t/año)	<b>PM<sub>10</sub></b> (t/año)
Fase A <sup>(1)</sup>	33.900	3.753	6.402
Fase B	86.094	9.514	16.272
<b>Total</b> (factor de capacidad 100%)	119.994	13.267	22.674
<b>Total</b> (factor de capacidad 23%)	<b>27.654</b>	<b>3.058</b>	<b>5.226</b>
Emisiones en g/kWh	<b>SO<sub>2</sub></b> (g/kWh)	<b>NO<sub>x</sub></b> (g/kWh)	<b>PM<sub>10</sub></b> (g/kWh)
	<b>30,7</b>	<b>3,4</b>	<b>5,8</b>

<b>Criterio</b>	<b>2009</b>	<b>2008</b>
Energía eléctrica generada (GWh)	900,41	926,08
Capacidad instalada (MW)	<b>446</b>	

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica). Relatório de Sustentabilidade, 2009.(CGTEE, 2009)*

*(1) Las Fases A y B son las distintas etapas en las que se construyó la central de Candiota. Cada una de las fases dispone de dos turbinas.*

Conviene resaltar que las emisiones mencionadas en Tabla 4.3 se refieren exclusivamente a la generación de electricidad y no abarca aquellas que podrían derivar del ciclo vida de la central. Esta limitación será de fundamental importancia para el capítulo seis, puesto las emisiones evitadas de las tecnologías que serán abordadas también se restringen a la generación de electricidad.

#### 4.3.1.3. Depletion Velocity (DV)

Otro dato relevante para el modelo es la *Depletion Velocity* (DV, en adelante). La DV es la velocidad por la cual los contaminantes son removidos de la atmósfera debido a las transformaciones químicas y a la deposición seca y húmeda. Spadaro (1999) ha estimado las DV para las partículas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, sulfatos y nitratos, teniendo en cuenta distintas regiones del globo (véase Tabla 4.4).

<sup>83</sup>El factor de capacidad de una central es el cociente entre la energía real producida y la energía eléctrica que sería producida si la central funcionara a plena capacidad, es decir, durante todas las horas del año.

**Tabla 4.4** *Depletion Velocity* por contaminantes y país

País	Contaminante				
	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Sulfatos	Nitratos
Brasil	1,26	0,84	1,49	3,11	1,33
Argentina	2,19	2,08	0,4	3,63	1,59
Uruguay	1,26	0,84	1,49	3,11	1,33
Paraguay	1,13	1,05	2,13	3,13	1,04
<b>Promedio</b>	<b>1,46</b>	<b>1,20</b>	<b>1,38</b>	<b>3,25</b>	<b>1,32</b>

Source: Spadaro, J. V. (2002): "A Simplified Methodology for Calculating the Health Impacts and Damage Costs of Airborne Pollution", unpublished report, 63 pages.

Es conveniente resaltar que para el caso de la central termoeléctrica de Candiota, se adoptó para cada contaminante el promedio de los valores estimados en cada país perteneciente a zona de impacto (véase Tabla 4.4 )

Tal y como hemos señalado anteriormente, la DV es una variable de mucha influencia en la estimación del impacto, puesto que valores más elevados suponen impactos menores y viceversa. De esta forma, en el análisis de sensibilidad se analiza esta variabilidad a partir de diferentes DV calculadas para diversas regiones del mundo.

#### 4.3.2. Distribución de la población

El UWM requiere los datos de la población afectada a nivel local y regional. La zona de impacto a nivel local es la región circular con un radio de 50 km a partir de la fuente emisora. Para ello, se hace necesario introducir la distribución de la población local en capas de 25 km<sup>2</sup> (5 x 5 km), obteniéndose la distribución presentada en la Figura 4.4. Dicha distribución se elaboró tras introducir en un sistema de información geográfica (SIG) los mapas digitales de población y división territorial disponibles en el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE)<sup>84</sup>. De esta forma, la densidad a nivel local es de 3 habitantes por km<sup>2</sup>.

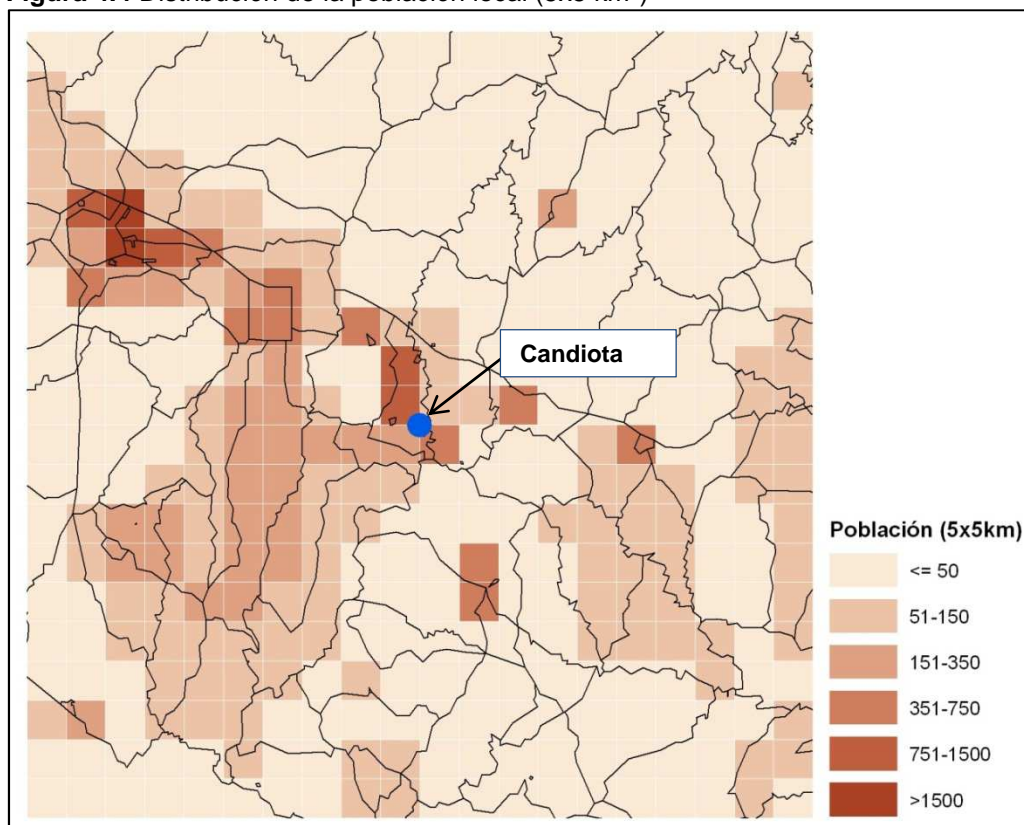
Tratándose del impacto a escala regional, Spadaro (1999) recomienda establecer un radio de 1.000 km a partir de la localización de la fuente generadora como zona de impacto. En términos de concentración dicha área podría variar entre 1.250 y 1.500 km de radio. De esta forma, tal y como se ha mencionado anteriormente, el impacto a escala regional se extiende, además de Brasil, por los tres países vecinos: Uruguay, Argentina y Paraguay. La densidad a nivel regional es de 36 habitantes por km<sup>2</sup>. En Brasil, la zona de impacto abarca los estados de Rio Grande do

<sup>84</sup>IBGE: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)



Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul y São Paulo. En Argentina, las provincias afectadas son: Buenos Aires, Chaco, Córdoba, Corrientes, Entre Ríos, Formosa, Misiones, Santa Fe y Santiago del Estero. En el caso de Uruguay y Paraguay, el impacto comprende todo el territorio de estos países. En la Tabla 4.5 se puede observar el área y la población afectada por la contaminación, así como la densidad a nivel regional.

**Figura 4.4** Distribución de la población local (5x5 km<sup>2</sup>)



Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas digitales facilitados por el IBGE (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística).

**Tabla 4.5** Área, población y densidad a escala regional

País	% Área	Área (km <sup>2</sup> )	Población	Densidad(personas/km <sup>2</sup> )
Brasil	49%	1.623.998	71.463.636	36
Paraguay	12%	406.752	6.340.641	
Uruguay	5%	177.414	3.392.897	
Argentina	33%	1.110.730	30.808.257	
<b>Total</b>		<b>3.318.894</b>	<b>112.005.431</b>	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de: Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): Aplicación "IBGE Estados" (<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>). Consulta realizada el 13 de junio de 2011. Argentina: Instituto Nacional de Estadística y Censos(INDEC). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2001). Disponible en <http://www.indec.mecon.ar>. Consulta realizada el 13 de junio de 2011. Paraguay: Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. Anuario Estadístico del Paraguay (2009). Disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>. Consulta realizada el 13 de junio de 2011. Uruguay: Instituto Nacional de Estadística (INE). Censo 2004, Fase I. Disponible en [http://www.ine.gub.uy/fase1new/divulgacion\\_definitivos.asp](http://www.ine.gub.uy/fase1new/divulgacion_definitivos.asp). Consulta realizada el 13 de junio de 2011.

#### 4.3.3. *Funciones concentración – respuesta (CRF)*

Las funciones concentración-respuesta (CRF, por sus siglas en inglés) establecen la correlación entre los niveles de concentración de contaminantes y los efectos sobre el receptor (casos de asma, días de actividad restringida, toneladas de cultivos perdidos, m<sup>2</sup> de superficie damnificada, etc.). Las CRF relacionadas con los impactos a la salud, objeto de este estudio, son funciones lineales sin umbrales específicos, siendo la concentración una variable independiente. Esto quiere decir que, a nivel de población, no existe un nivel límite de concentración donde, por debajo del mismo, el impacto a la salud desaparezca<sup>85</sup>.

Las CRF son el resultado de estudios epidemiológicos que demostraron una estrecha relación entre los efectos sobre la salud humana y un aumento de la contaminación atmosférica. La complejidad de dichos estudios redunda en establecer relaciones de causalidad entre un determinado efecto sobre la salud humana y la concentración de contaminantes. Dicha dificultad ocurre porque existen, además de las concentraciones específicas de un determinado contaminante, otros factores externos que de alguna manera influyen en el análisis. Los factores más comunes son los hábitos personales, alimentación y estado de salud. Por ejemplo, un individuo fumador parece ser más propenso a desarrollar episodios de bronquitis que otro que no fume. Este factor de confusión es tenido en cuenta en los análisis de regresión. Rabl & Spadaro (1999) han determinado otras fuentes de incertidumbre que afectan a las CRF, como los niveles previos de contaminación existentes y su composición, parámetros meteorológicos, entre otros. No obstante, pese a los niveles de incertidumbre verificados, numerosos estudios han demostrado que los efectos de la contaminación suponen un elevado impacto sobre la salud humana.

En realidad, una mejor aproximación a los efectos reales debería considerar la dosis recibida por cada individuo. Sin embargo, medir dicha dosis supondría una tarea ardua que demandaría mucho tiempo y recursos, puesto que envuelven variables muchas veces vinculadas con el comportamiento de los individuos (nivel de actividad física, tiempo de exposición, etc.).

Según Rabl (2001), la creación de las CRF comporta tres pasos básicos. El primero de ellos es un análisis crítico de los estudios epidemiológicos disponibles y

---

<sup>85</sup> Este criterio sería del todo correcto a nivel de la población pero individualmente podría ocurrir lo contrario.

adecuación al entorno de análisis. El segundo paso consiste en adaptar dichos estudios a la realidad enfocada. Por último, es conveniente verificar las experiencias y recomendaciones de uso de esas funciones en diversos países del mundo.

Tal y como se ha indicado anteriormente, las CRF derivan de una serie de estudios epidemiológicos que a su vez establecen una correlación directamente proporcional entre el aumento de las concentraciones de contaminantes y su efecto sobre un determinado aspecto de salud (aumento de los casos de bronquitis). Los estudios epidemiológicos son fundamentales a la hora de establecer las tasas de incremento de riesgo relativo (IRR), puesto que son capaces de establecer relaciones de causalidad entre las diversas enfermedades y su vinculación con la contaminación atmosférica.

No obstante, la labor al establecer CRF específicas para un caso de estudio es un tanto compleja y requiere gran cantidad de recursos para llevar a cabo dichos estudios. Además, cada criterio (casos de asma, por ejemplo) dispone de una serie de causas que a su vez pueden verse influenciadas directa o indirectamente por un conjunto de factores.

La forma de operar con las CRF es un tanto sencilla. El cálculo de la pendiente se obtiene tras multiplicar la **Tasa de Incremento de Riesgo Relativo** (IRR, en adelante)<sup>86</sup> por la **Tasa de Incidencia** (IL<sup>87</sup>, en adelante) para cada tipo de afecciones (casos anuales de asma, bronquitis por receptor en riesgo; adultos, niños, etc.) y por último, por la **fracción de población afectada** ( $f_{pop}$ ). La IRR (% por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es el porcentaje de cambio en la tasa de ocurrencia de una determinada enfermedad para la población de riesgo, en función del aumento en los niveles de concentración de un determinado contaminante. Se trata de un indicador que permite establecer relaciones de causalidad entre el contaminante objeto de análisis y su particular efecto sobre la salud. La IL (casos por año) es la cantidad de casos de una enfermedad; ej. casos de asma en adultos con más de 25 años. La  $f_{pop}$  (%), tal y como el nombre indica, es el porcentaje representativo del grupo poblacional afectado por la función; ej. porcentaje de adultos con más de 30 años. De esta forma, la pendiente de las CRF viene dada por la siguiente ecuación:

---

<sup>86</sup>Increased Risk Ratio, en inglés.

<sup>87</sup>Incidence Level, en inglés.

$$CRF_{pendiente} = IRR \times IL \times f_{pop}$$

*Ecuación 4-13*

Las CRF establecidas para el caso de la central Candiota tuvieron en cuenta los estudios previos que recopilan aquellas funciones más relevantes a la hora de estimar los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana. Uno de los estudios más contundentes en este sentido es el publicado por Rabl (2001). Este autor ofrece una amplia base de datos de funciones y valores específicos de las IRR, que han sido publicados a lo largo de los años. Otra fuente relevante de consulta son los resultados del proyecto ExternE (European Commission, 2005). El proyecto ExternE, desarrollado por la Comisión Europea, es uno de los estudios más completos en términos de externalidades de la generación de energía eléctrica. Así, también se han tenido en cuenta algunas CRF usadas en dicho proyecto. De esta forma, las funciones estudiadas en el caso de Candiota representan esquemas bastante fieles con respecto a las últimas CRF aplicadas en estudios de igual naturaleza.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el estudio de los impactos causados por la central de Candiota tuvo en cuenta la clasificación de las partículas en términos de  $PM_{10}$  y, por ende, las CRF serán representadas en este formato. Las CRF para los contaminantes secundarios (sulfatos y nitratos) se obtienen multiplicándose la CRF asociada con las  $PM_{10}$  por 1,67 (Spadaro, 1999 & European Commission, 2005). Este multiplicador se basa en el reparto entre en el aire (mezcla). De esta manera, el reparto en el aire entre  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  es de aproximadamente 0,6;  $\frac{PM_{2,5}}{PM_{10}} \sim 0,6$ . Valga lo anterior para resaltar que bajo este supuesto estamos suponiendo que las partículas coarse ( $PM_{2,5-10}$ ) tienen un efecto despreciable sobre la salud. En este sentido, el precepto fundamental de este estudio es que en términos de toxicidad la totalidad de los sulfatos y nitratos se encuentran en el rango de las partículas finas. En otros términos:

$$CRF_{sulfatos;nitratos} = 1,67 \times CRF_{PM10}$$

De esta manera, los resultados serán representados en estos términos pero en el análisis de sensibilidad se demostrará la variabilidad de los resultados si se consideran los efectos de los nitratos iguales a los de las partículas ( $CRF_{nitrates} = CRF_{PM10}$ ), así como otros escenarios que estiman distintos escenarios respecto a la toxicidad de los nitratos y sulfatos.

Para el  $\text{SO}_2$  solo se contabilizan los efectos de la mortalidad aguda y los ingresos hospitalarios por causas respiratorias. Además, tal y como se ha mencionado previamente, actualmente no se ha comprobado que los efectos directos de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) sobre la salud. Conviene aclarar que la mayoría del  $\text{NO}_x$  emitido a la atmósfera es en forma de  $\text{NO}$ , que a su vez es rápidamente oxidado en la atmósfera transformándose en  $\text{NO}_2$ . El  $\text{NO}_2$ , pese a tener propiedades oxidantes<sup>88</sup>, todavía no se han demostrado relaciones de causalidad entre este contaminante e impactos sobre la salud humana. Por este motivo, en este estudio, los efectos del  $\text{NO}_x$  se restringen básicamente a los compuestos secundarios resultantes de su transformación en la atmósfera. Asimismo, en el Anexo 1, se presenta un resumen de todas las CRF utilizadas y sus respectivas IRR, IL y  $f_{\text{pop}}$ .

#### 4.3.3.1. Mortalidad infantil (IF)

La CRF para la mortalidad infantil tiene como objetivo estudiar los decesos infantiles asociados con la contaminación atmosférica. A consecuencia, resulta fundamental conocer el número de óbitos postneonatales (entre el mes 1 y mes 12). En un principio, identificar el número de muertes por causas respiratorias podría parecer una tarea fácil, pero no siempre los datos disponibles son fiables y, por ende, su incertidumbre podría resultar elevada. Dicho inconveniente se hace patente en este estudio dado que las tasas de mortalidad infantil por causas respiratorias, obtenidas a partir de fuentes oficiales, distan mucho de la media internacional. De hecho, Fischer *et ál.*(2007), en un estudio sobre la mortalidad infantil en Brasil, afirman que uno de los problemas encontrados en las bases de datos oficiales<sup>89</sup> es el subregistro de óbitos. De hecho, dichos autores afirman que los datos disponibles sobre mortalidad infantil podrían cubrir solo un 80% de los registros. Pedrosa *et ál.* (2006) resaltan la importancia de la calidad de la información sobre mortalidad y su estrecha relación con el contenido de los llamados certificados de defunción, cruciales a la hora de obtener diagnósticos fidedignos. Además, señalan que en Brasil *la poca notificación de muertes, el relleno incorrecto o incompleto de los certificados de defunción, informaciones contradictorias e inconsistentes (...) y la baja fiabilidad de los datos oficiales deben ser rigurosamente monitoreadas por las secretarías municipales y estatales de salud.*

---

<sup>88</sup>El  $\text{NO}_2$  tiene propiedades oxidantes inferiores al ozono, por ejemplo.

<sup>89</sup>Las fuentes oficiales de datos sobre mortalidad en Brasil se encuentran disponibles en el Datasus (Ministerio de Salud): [www.datasus.org](http://www.datasus.org)

Por otro lado, la CRF analizada en Rabl (2001) aplica la tasa de mortalidad infantil por causas respiratorias estimada para los Estados Unidos. En este país, la mortalidad infantil asume la magnitud de 7,2 muertes por cada 1.000 nacidos vivos, siendo un 1,24 de estas muertes originadas por causas respiratorias (17,2%). De esta forma, debido a la dificultad de encontrar datos fidedignos para la región incluida en el caso de estudio, parece razonable utilizar el porcentaje de muertes por causas respiratorias recomendado por Rabl (2001): un 17,2%. De esta forma, tras aplicar el porcentaje de un 17,2% sobre la cantidad total de muertes infantiles postnatales (<1 año; 1 a 12 meses) de cada país, se han podido estimar los eventos asociados con las causas respiratorias (véase Tabla 4.6)

**Tabla 4.6** Mortalidad infantil - Causas respiratorias- (caso de estudio)

País	Afectados <sup>1</sup>	f <sub>POP</sub>	M <sup>2</sup> <sub>NIÑOS</sub>	M <sub>NIÑOS</sub> (causas respiratorias)
	Millones de personas	%	muertes por cada 1.000 nacidos vivos	muertes por cada 1.000 nacidos vivos
Brasil <sup>(a)</sup>	1,93	2,7	12,9	2,22
Argentina <sup>(b)</sup>	0,90	3,6	11,4	1,96
Paraguay <sup>(c)</sup>	0,30	5,0	24,7	4,25
Uruguay <sup>(d)</sup>	0,01	2,9	11,3	1,95
TOTAL	3,20	3,0	13,5	2,33

<sup>1</sup> Afectados (niños menores de 1 año) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup> M = muertes de niños.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

-Ministerio da Saúde, Brasil: Base de datos [Datasus](http://www.datasus.gov.br) [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

-Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

-Naciones Unidas. Consejo Económico Social. Aplicación del pacto internacional de derechos económicos, sociales y culturales. E/C.12/PRY/3. 26 de febrero de 2007.

-Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004-[www.inecub.uy](http://www.inecub.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

El valor más común de la IRR para la mortalidad infantil es de 0,40% por  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ . Se trata del mismo valor aplicado en el proyecto ExternE (European Commission, 2005) y que a su vez ha sido obtenido del estudio de cohorte elaborado por Woodruff *et al.* (1997)<sup>90</sup>. De esta forma, según los datos mostrados en la Tabla 4.6 y siguiendo el esquema de las CRF (Ecuación 4-13), se calculó la pendiente de CRF para la mortalidad infantil:

Función Exposición Respuesta, S <sub>CRF</sub>	<b>2,68 x 10<sup>-7</sup></b>
[casos por año por persona - $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ]	

<sup>90</sup>El estudio de cohorte elaborado por Woodruff *et al.* (1997) tuvo en cuenta 4 millones de niños en Estados Unidos entre 1 mes de vida y 1 año.

#### 4.3.3.2. Mortalidad crónica (CM)

La CRF para la mortalidad crónica es una función que reviste gran importancia en lo que concierne a la evaluación del impacto de la contaminación sobre la salud humana. Con carácter general, existen dos metodologías que abordan dicha CRF desde enfoques distintos. El primer enfoque procura expresar la mortalidad crónica en términos del incremento en el número de muertes prematuras asociadas con la contaminación atmosférica. Bajo este criterio, una vez conocido el número de muertes prematuras, se multiplica por el valor de una vida estadística (VSL) como coste unitario. El otro enfoque aborda el problema en términos de la “pérdida de expectativa de vida” (LLE<sup>91</sup>, en adelante), llegando así al cómputo de los años de vida perdidos (YOLL, en adelante<sup>92</sup>). Este último enfoque utiliza el valor de un año de vida perdido (VOLY) como coste unitario.

La discusión sobre qué metodología aplicar a la hora de valorar las externalidades asociadas con la mortalidad crónica (*long term mortality*) ha sido objeto de estudio en muchas publicaciones especializadas. Rabl (2003) recomienda expresar la mortalidad en términos de los YOLL, contrarrestando el enfoque basado en el número de muertes prematuras. Los defensores del enfoque vinculado con los YOLL aducen que la contaminación es una causa que contribuye a la muerte, a diferencia, por ejemplo, de los cánceres o accidentes.

En este estudio, la CRF para la mortalidad crónica aplica los YOLL como precepto fundamental, a pesar de que también se ha calculado el número de muertes prematuras como método alternativo para aquellos que eventualmente prefieran estimar la mortalidad a partir de este análisis.

La elección de los YOLL atiende a dos principios básicos. En primer lugar, las causas que contribuyen a la muerte son mucho más elevadas con relación a los valores detectados en los estudios epidemiológicos (Rabl, 2001a). Además, Rabl (2001a) apunta que el número de muertes por causas contributivas no puede ser simplemente sumado, mientras que los YOLL sí permiten esta operación. En definitiva, tratándose de causas contributivas, resulta más coherente aplicar los YOLL en vez del número de muertes prematuras. Además, es de amplio reconocimiento (Rabl, 2003) que los impactos de la contaminación sobre la salud humana son más elevados que

---

<sup>91</sup>LLE (en inglés) Loss of Life Expectancy (LLE)

<sup>92</sup>YOLL (en inglés): Years of Life Lost

aquellos medidos a través de los métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos<sup>93</sup> (Saez, *et ál.*, 1999).

No obstante, Rabl (2003) apunta que muchos estudios han utilizado el número de muertes prematuras como valor de referencia, aunque a partir de 1996 se ha ido produciendo un giro hacia la estimación de la mortalidad crónica mediante los YOLL. El mismo proyecto ExternE (European Comission, 2005) utiliza esta metodología a la hora de diseñar las CRF relacionadas con la mortalidad crónica.

Siguiendo los postulados mencionados arriba, la ecuación general de CRF para la mortalidad crónica requiere estimar la pérdida de la expectativa de vida entre adultos con más de 30 años (Rabl, 2001). Este dato, correspondiente a la **IL**, ha sido obtenido tras multiplicar la tasa de mortalidad<sup>94</sup> (IM, en adelante) por la expectativa de vida asociada con cada grupo de edad. Una vez calculada la **IL**, se multiplica por la **IRR** y  $f_{pop}$ . La **IRR** aplicada en este estudio fue de 0,6% por  $\mu\text{gPM}_{2,5}/\text{m}^3$ . La elección de este valor se justifica por el hecho de que viene siendo utilizado con más frecuencia en los estudios asociados con los efectos de la contaminación sobre la mortalidad crónica. En la misma línea, los proyectos CAFE (AEAT, 2005a) y NEEDS (NEEDS, 2007), después de hacer una exhaustiva revisión de estudios epidemiológicos, también han utilizado la **IRR**<sup>95</sup> de 0,6% por  $\mu\text{gPM}_{2,5}/\text{m}^3$ . No obstante, conviene señalar que el proyecto ExternE utilizó la **IRR** de 0,5% por  $\mu\text{gPM}_{2,5}/\text{m}^3$  (Pope *et ál.*, 2002). En el estudio desarrollado por Pope<sup>96</sup>, se han calculado los valores de la **IRR** para dos periodos distintos (1979-1983 y 1999-2000). El valor utilizado en el ExternE es la media aritmética.

Una vez conocida la **IRR** y la **IL** solo cabría multiplicar los valores anteriores por la  $f_{pop}$  (porcentaje de adultos con más de 30 años residentes en la zona de impacto). La Ecuación 4.4 representa el esquema para calcular la pendiente de la CRF para la mortalidad crónica (YOLL). Se observa que la **IRR** utilizada en esta función viene expresada en términos de las partículas finas ( $\text{PM}_{2,5}$ ) y, por eso, la correspondiente pendiente asociada con las  $\text{PM}_{10}$  se obtiene tras multiplicar por 0,6 (véase la ecuación abajo).

---

<sup>93</sup> Dichos estudios solo abarcan los impactos agudos, observados durante un corto periodo de exposición.

<sup>94</sup> Cantidad total de muertes por grupos de edad divididas por el número de personas pertenecientes a este grupo de edad.

<sup>95</sup> Cabe resaltar que el valor de la **IRR** corresponde a las  $\text{PM}_{2,5}$ . Para hallar el valor asociado con las  $\text{PM}_{10}$ , se hace necesario aplicar el factor de conversión de 0,6 (European Comission, 2005):  $\text{CRF}(\text{PM}_{2,5}) = 1,67 \times \text{CRF}(\text{PM}_{10})$ .

<sup>96</sup> Pope *et ál.* (2002), tabla nº 2.



#### **Ecuación 4-14**

##### **Función concentración-respuesta, $S_{CRF}$**

[YOLL/[yr.pers.  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ]

**$IRR \times 0,6 \times IM \times LLE \times f_{pop}$**

*Donde,*

*IRR= Tasa de incremento de riesgo relativo, expresada en  $\mu\text{gPM}_{2,5}/\text{m}^3$*

*0,6 = En su caso, factor de conversión de  $\text{PM}_{2,5}$  en  $\text{PM}_{10}$*

*IM = Índice de mortalidad (muertes por persona por año)*

*LLE = expectativa de vida según el grupo de edad determinado.*

*$f_{pop}$  = fracción de la población (%) con más de 30 años de edad.*

Es conveniente resaltar que para calcular la pendiente de la CRF homogeneizada para todo el caso de estudio, ha sido necesario estudiar la tasa de mortalidad, expectativa de vida y la  $f_{pop}$  de la población incluida en la zona de impacto (Brasil, Uruguay, Argentina y Paraguay). Para ello, se ha calculado la CRF por años quinquenales de edad, siendo la pendiente final la media de los valores encontrados entre los individuos con más de treinta años. En la Tabla 4.8 se presentan los datos utilizados para calcular la pendiente de la mortalidad crónica para Brasil. Asimismo, los datos de los demás países afectados se encuentran disponibles en los anexos 6 a 8. Los valores situados en la última columna de la derecha ( $n^{\circ}$  muertes/persona. $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ), se refieren al número de muertes prematuras estimadas para este caso de estudio que serán utilizadas para ejecutar el análisis de sensibilidad.

Tras obtener las funciones asociadas a cada uno de los cuatro países incluidos en la zona de impacto (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay), se calculó la media entre ellas para hallar la pendiente final de la función, homogeneizada para todo el caso de estudio. En la Tabla 4.7 se puede observar la estructura final de la CRF para la mortalidad crónica.

No conviene perder de vista que los efectos de la contaminación sobre la mortalidad crónica valorados para el caso de Candiota se fundamentan en términos de los YOLL (pérdida de expectativa de vida). Por las razones expuestas arriba, consideramos que la forma de abordar este criterio de salud explica mejor el daño y sigue la misma línea de los estudios mencionados en los párrafos anteriores. No obstante, no descartamos otras líneas de investigación que eventualmente prefieran abordar este criterio en términos del  $n^{\circ}$  de muertes prematuras y, por ello, presentamos la pendiente de la CRF también en estos términos. Además, este tipo de estimación de la mortalidad crónica será abordado en el análisis de sensibilidad.

**Tabla 4.7** Datos CRF Mortalidad crónica (adultos > 30 años)

<b>País</b>	<b>f<sub>POP</sub> %</b>	<b>S<sub>CRF</sub> (anual YOLL por [persona. μgPM<sub>10</sub>/m<sup>3</sup>])</b>	<b>S<sub>CRF</sub> (muertes por [persona. ugPM<sub>10</sub>/m<sup>3</sup>])</b>	<b>YOLL (promedio &gt; 30 años)</b>
Brasil	51	3,85 x 10 <sup>-4</sup>	2,19 x 10 <sup>-5</sup>	18
Argentina	51	3,77 x 10 <sup>-4</sup>	2,75 x 10 <sup>-5</sup>	14
Uruguay	54	4,32 x 10 <sup>-4</sup>	3,30 x 10 <sup>-5</sup>	13
Paraguay	37	2,43 x 10 <sup>-4</sup>	1,32 x 10 <sup>-5</sup>	18
<b>Promedio caso de estudio</b>	48	3,76 x 10 <sup>-4</sup>	2,33 x 10 <sup>-5</sup>	<b>16</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.8** CRF para mortalidad crónica (Brasil)

Grupo de edad	Población <sup>(a)</sup>	f <sub>pop</sub>	LE <sup>(b)</sup> (años)	Índ. mort <sup>(c)</sup>	nº muertes <sup>(d)</sup>	Años vida perdidos x muertes	CRF (anual YOLL por [persona.µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup> ])	CRF nº muertes/ persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
30–34	5.914.012	8,3%	46,4	0,0019	11.237	521.379,30	3,17E-04	6,84E-06
35–39	5.297.763	7,4%	41,8	0,0024	12.874	538.114,98	3,66E-04	8,75E-06
40–44	5.097.816	7,1%	37,3	0,0033	16.976	633.194,63	4,47E-04	1,20E-05
45–49	4.807.393	6,7%	32,8	0,0046	22.066	723.762,63	5,42E-04	1,65E-05
50–54	4.105.496	5,7%	28,5	0,0069	28.369	808.515,85	7,09E-04	2,49E-05
55–59	3.321.709	4,6%	24,5	0,0098	32.387	793.473,24	8,60E-04	3,51E-05
60–64	2.549.027	3,6%	20,6	0,0149	37.879	780.297,95	1,10E-03	5,35E-05
65–69	1.851.250	2,6%	17	0,0225	41.709	709.047,26	1,38E-03	8,11E-05
70–74	1.438.575	2,0%	13,7	0,0336	48.379	662.796,10	1,66E-03	1,21E-04
75–79	1.010.597	1,4%	10,7	0,0537	54.269	580.678,93	2,07E-03	1,93E-04
80–	1.103.057	1,5%	7,0 <sup>(*)</sup>	0,1162 <sup>(*)</sup>	128.140	896.981,45	2,93E-03	4,18E-04
<b>Total</b>	<b>71.463.636</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>486.167</b>	<b>10.924.084</b>	<b>7,54E-04</b> (promedio >30 años)	<b>4,28E-05</b> (promedio >30 años)

(a) Fuente: Datasus. El dato abarca la población de los estados brasileños incluidos en la zona de impacto: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo y Mato Grosso do Sul. <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=0206> (consulta realizada el 04 de enero de 2012).

(b) **LE:** Expectativa de vida. Fuente: WHO Life tables for WHO Member States. Disponible en [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (Consulta realizada el 10 de enero de 2012) / IBGE (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-) <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/tabuadevida/2009/default.shtm>

(consulta realizada el 11 de septiembre de 2011). (\*) Se aplicó la media ponderada entre las expectativas de vida/tasas de mortalidad asociadas con los grupos de edad. Se utilizó dicho procedimiento porque los grupos de edad presentes en la Organización Mundial de Salud no coincidían con aquellos ofrecidos en los datos de población brasileños (IBGE).

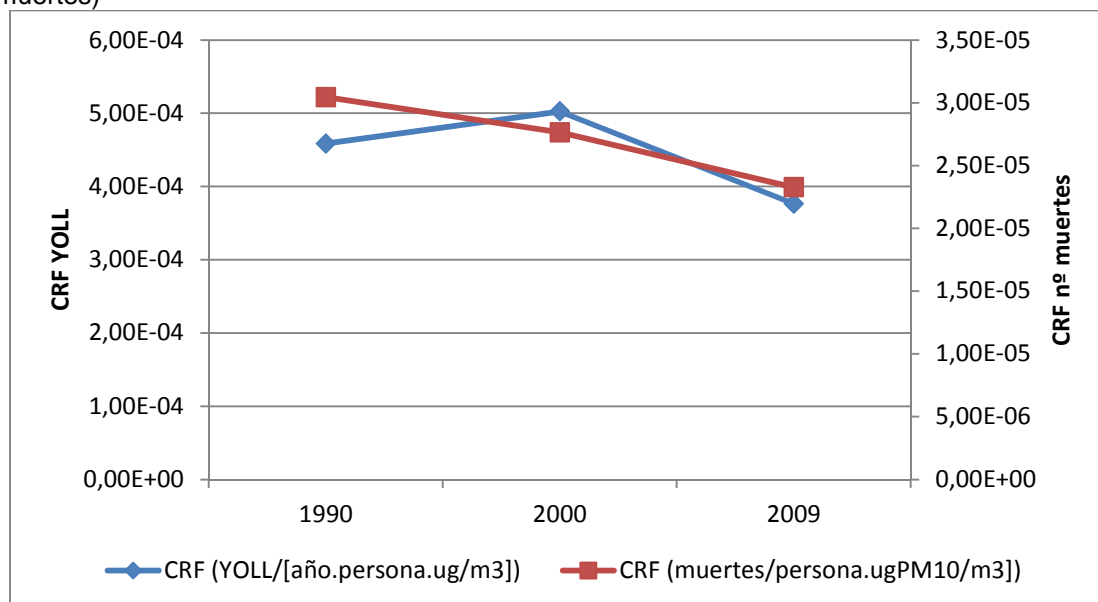
(c) **Índ. Mort**= Índice de mortalidad. Es la cantidad de muertes por grupo de edad por año, dividido por la población perteneciente a este grupo de edad. Fuente: WHO Life tables for WHO Member States. Disponible en [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (Consulta realizada el 10 de enero de 2012).

(d) Nº muertes = población x índice de mortalidad.

En la Tabla 4.7 se puede observar también las estimativas (promedio > 30 años) de los YOLL para cada país afectado en este estudio. El valor medio encontrado para este caso de estudio es de 16 YOLL por muerte, hallado a partir del análisis de las tablas de vida aplicadas a la hora de estimar la CRF (véase Tabla 4.8 ). A modo ilustrativo, cabe resaltar que el proyecto ExternE (European Comission, 2005) estimó para la Unión Europea un promedio de 11 YOLL por muerte. Esto ocurre porque la población analizada en este caso de estudio es más joven, haciendo que se pierdan más YOLL con respecto a Europa.

A modo ilustrativo también se ha calculado la evolución de la pendiente de la CRF para otros dos periodos distintos (1990 y 2000). En el Gráfico 4.4 se presenta la eventual composición de la misma. La pendiente de la CRF es función en este caso de la tasa de mortalidad, expectativa de vida y estructura de la población. Tal y como se ha dicho anteriormente, esta no es función de la concentración y, por ende, una conclusión exhaustiva de cómo se situaría el impacto en los periodos estudiados requeriría conocer el nivel de las concentraciones en cada periodo. Cabe resaltar que la pendiente aplicada en este caso de estudio viene representada por la línea azul (CRF/YOLL) en el punto asociado al año de 2009.

**Gráfico 4.4** Evolución de la pendiente de la CRF para mortalidad crónica (YOLL y nº de muertes)



Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.3.3. Mortalidad aguda (MA)

La CRF asociada con la mortalidad aguda solo tuvo en cuenta los efectos asociados con el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Es conveniente resaltar que los efectos de este tipo de mortalidad asociados con las partículas (PM) suelen representar un porcentaje muy reducido del impacto total por mortalidad. Además, Rabl (2001) y Spadaro (1999) apuntan que dichos impactos estarían recogidos en la mortalidad crónica. Por este motivo, en este estudio se siguieron los preceptos mencionados en Rabl (2001) y Spadaro (1999), donde solo se consideró la CRF para la mortalidad aguda asociada con el SO<sub>2</sub>.

Es conveniente resaltar que, a diferencia de la mortalidad crónica, la mortalidad aguda considera a toda la población<sup>97</sup> como colectivo afectado. Lo mismo ocurre con la **IL**, cuya tasa de mortalidad abarca todas las muertes verificadas entre la población objeto del estudio (0,007 muertes por habitante/año). En lo que se refiere a la **IRR**, Rabl (2001) recomienda utilizar el valor de **0,046%** por µgSO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Por último, para representar la mortalidad aguda en términos de los YOLL es necesario multiplicar la CRF por el promedio de los años de vida perdidos (YOLL) por cada muerte. Rabl (2001) y el proyecto ExternE (European Commission, 2005) han considerado un promedio de 0,5 YOLL (6 meses) por muerte. De esta manera, la CRF aplicada en este caso de estudio aplica dicho valor como parámetro de referencia a la hora de expresarla en términos de YOLL.

Tras introducir los aspectos mencionados arriba, la pendiente de la CRF asume la siguiente forma:

Función Exposición Respuesta, S <sub>CRF</sub> [YOLL anuales por persona por µgSO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	<b>1,62 x 10<sup>-06</sup></b>
---	--------------------------------

#### 4.3.3.4. Bronquitis crónica (CB)

El punto de partida hacia la construcción de la CRF para la bronquitis crónica reside en la estimativa de los nuevos casos de bronquitis por año. El proyecto ExternE (European Commission, 2005), basado en los estudios desarrollados por Abbey *et ál.* (1993, 1995), estimó aproximadamente 378 nuevos casos por año por 100.000 personas (**IL**: tasa de incidencia). Ante la falta de estudios similares para los países

---

<sup>97</sup>De esta manera, la f<sub>pop</sub> asume el valor de 100%

incluidos en este caso de estudio, se ha aplicado esta misma tasa de incidencia como valor de referencia. Tratándose de la **IRR**, Abbey *et ál.* (1995b) estimaron dicho valor en 0,70% por  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ , valor aplicado en este estudio. La elección de este valor es respaldada por su amplia utilización en múltiples proyectos, como es el caso del ExternE. También se trata del valor de referencia recomendado en Rabl (2001). Tras conocerse los valores de la IRR y de la IL, solo queda incorporar la  $f_{\text{pop}}$ , que en esta función son los adultos con más de 27 años. En la Tabla 4.9 se presentan los valores de la  $f_{\text{pop}}$  e **IL**, así como el resultado final de la pendiente aplicada en este estudio, que ha sido calculada según la ecuación general de las CRF (Ecuación 4-13).

**Tabla 4.9** Datos CRF bronquitis crónica (adultos > 27 años)

<b>País</b>	<b>Afectados<sup>1</sup></b> <i>millones</i>	<b><math>f_{\text{POP}}</math></b> <i>%</i>	<b><math>S_{\text{CRF}}</math><sup>2</sup></b> <i>(pendiente)</i> casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$
Brasil <sup>(a)</sup>	42,9	60	$1,60 \times 10^{-5}$
Argentina <sup>(b)</sup>	12,9	42	$1,11 \times 10^{-5}$
Paraguay <sup>(c)</sup>	2,9	46	$1,21 \times 10^{-5}$
Uruguay <sup>(d)</sup>	1,9	56	$1,47 \times 10^{-5}$
<b>TOTAL</b>	<b>60,6</b>	<b>57</b>	<b><math>1,46 \times 10^{-5}</math></b>

<sup>1</sup> Receptores (adultos con más de 27 años) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup>  $S_{\text{CRF PM}_{\text{sulfatos;nitratos}}} = 1,67 \times S_{\text{CRF PM}_{10}}$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

(a) Ministerio da Saúde – Brasil: Base de datos Datasus [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

(b) Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

(c) Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. “Anuario Estadístico del Paraguay”, 2009, capítulo “Población y Viviendas”, cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(d) Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004-[www.inecub.uy](http://www.inecub.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

#### 4.3.3.5. Días de trabajo perdidos (WDL)

Según Rabl (2001), los primeros trabajos científicos relacionados con la restricción laboral a causa de la contaminación atmosférica son aquellos desarrollados por Ostro (1987) y el ERPURS (1997). El primero estimó para Estados Unidos una tasa de incidencia (**IL**) de 2,365 días de trabajo perdidos (WDL<sup>98</sup>, en adelante) por empleado por año. Además, se estimó la **IRR** en 0,46%  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ . El segundo estudio es el ERPURS (1997), que tuvo Francia como país de estudio, estimó la IL en 1,057 WDL por empleado por año y la IRR en 0,95%  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ . Por otro lado,

<sup>98</sup> Work Days Lost (en inglés)

estudios más recientes como el proyecto desarrollado por la AEA Technology Environment<sup>99</sup> (AEAT, 2005) han estimado aproximadamente 4,5 días de trabajo perdidos por empleado por año para la Unión Europea.

En este caso de estudio se utilizó la tasa de incidencia (IL) de 4,5 WDL puesto que representa el conjunto de países de la Unión Europea, mientras que los valores estimados en el Ostro (1987) y ERPURS (1997) corresponden cada uno a un solo país (EEUU y Francia). La IRR utilizada se fundamenta en el valor propuesto por Ostro (1987): 0,46%  $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ . Los valores de la  $f_{\text{pop}}$  están representados en la Tabla 4.10, así como el resultado final de la pendiente de la CRF.

**Tabla 4.10** Datos y pendiente CRF –WDL- (población entre 15 y 64 años)

País	Afectados <sup>1</sup>	$f_{\text{POP}}$	$S_{\text{CRF}}$ <sup>2</sup>
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$
Brasil <sup>(a)</sup>	50,0	70	$1,45 \times 10^{-2}$
Argentina <sup>(b)</sup>	18,8	61	$1,26 \times 10^{-2}$
Paraguay <sup>(c)</sup>	4,6	72	$1,49 \times 10^{-2}$
Uruguay <sup>(d)</sup>	2,2	66	$1,37 \times 10^{-2}$
TOTAL	75,6	68	$1,40 \times 10^{-2}$

<sup>1</sup> Receptores (población empleada de 15 a 64 años) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup>  $S_{\text{CRF}} \text{PM}_{\text{sulfatos,nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRF}} \text{PM}_{10}$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

(a) Ministerio da Saúde – Brasil: Base de datos Datasus [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

(b) Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

(c) Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. “Anuario Estadístico del Paraguay”, 2009, capítulo “Población y Viviendas”, cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(d) Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004-[www.inecub.uy](http://www.inecub.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

#### 4.3.3.6. Días de actividad restringida (RAD), días de actividad restringida menor (mRAD) y días de actividad restringida neta (netRAD)

Los días de actividad restringida (RAD<sup>100</sup>, en adelante), como el propio nombre lo define, son aquellos momentos en los cuales un determinado individuo tiene su actuación laboral restringida. Ostro (1987), en un estudio realizado con 12.000 individuos de 68 regiones metropolitanas, verificó una correlación positiva entre la

<sup>99</sup> Proyecto CAFE.

<sup>100</sup> Restricted Activity Days - RAD (en inglés)

concentración  $PM_{2,5}$  y los RAD. Así, estimó la  $IRR^{101}$  en 0,475% por  $\mu g/m^3 PM_{2,5}$ . Dicho valor puede ser considerado como referencia dada su amplia utilización en diversos estudios, tales como el proyecto ExternE (European Commission, 2005). De esta forma, la  $IRR$  aplicada en este estudio también adoptó el valor propuesto por Ostro (1987). En cuanto a las tasas de incidencia ( $IL$ ), se adoptó el valor de 19 RAD por persona por año, estimado por The US Coal Fuel Cycle Report<sup>102</sup>(ORNL/RFF, 1994). Este último estudio también ha sido utilizado como referencia en el proyecto ExternE. Una vez conocidos los valores de la  $IRR$  e  $IL$ , solo falta incorporar los datos de la población afectada ( $f_{pop}$ ). Conviene señalar que la  $IRR$  de esta función tiene relación con los efectos de las partículas finas ( $PM_{2,5}$ ), por lo que la pendiente correspondiente a las  $PM_{10}$  se obtiene tras multiplicarse la pendiente de las  $PM_{2,5}$  por 0,6. En la Tabla 4.11 se presentan los datos de la  $f_{pop}$  y la pendiente resultante de la CRF.

**Tabla 4.11** Datos y pendiente CRF - RAD (población entre 15 y 64 años)

País	Afectados <sup>1</sup>	$f_{POP}$	$S_{CRF}^2$
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por $\mu g PM_{10}/m^3$
Brasil <sup>(a)</sup>	54,0	76	$4,09 \times 10^{-2}$
Argentina <sup>(b)</sup>	15,6	51	$2,74 \times 10^{-2}$
Paraguay <sup>(c)</sup>	3,9	62	$3,33 \times 10^{-2}$
Uruguay <sup>(d)</sup>	2,1	62	$3,35 \times 10^{-2}$
TOTAL	75,6	68	$3,75 \times 10^{-2}$

<sup>1</sup>Receptores (población empleada de 15 a 64 años) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup> $S_{CRF} PM_{sulfatos;nitratos} = 1,67 \times S_{CRF} PM_{10}$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

(a) Ministerio da Saúde – Brasil: Base de datos Datasus [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

(b) Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

(c) Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. “Anuario Estadístico del Paraguay”, 2009, capítulo “Población y Viviendas”, cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(d) Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004-[www.inecubuy.gov.uy](http://www.inecubuy.gov.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

Los días de actividad restringida menor ( $mRAD$ , en adelante) significan la asistencia al trabajo en condiciones inapropiadas que reducen el rendimiento y la productividad. En realidad, sigue la misma filosofía de los RAD pero su influencia es mucho más sutil. Ostro & Rothschild (1989) han establecido valores de la  $IRR$  e  $IL$  para los  $mRAD$  entre personas en edad laboral de 18-64 años. La  $IRR^{103}$  estimada por

<sup>101</sup> 95% intervalo de confianza; 0,417%, 0,533%.

<sup>102</sup> Equivalente a una prevalencia de 5,2%

<sup>103</sup> 95% intervalo de confianza: 0,60%, 0,88%



estos autores fue de 0,74% por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{2,5}$ . La **IL** (tasa de incidencia) ha sido establecida en 7,8 *mRAD* por persona (18 a 64 años) por año. Al igual que las funciones anteriores, el cálculo de la pendiente requiere los datos de la población afectada ( $f_{\text{pop}}$ ), tal y como se muestra en la Tabla 4.12. Además, para obtener la pendiente asociada con las  $\text{PM}_{10}$  se multiplica el valor de las  $\text{PM}_{2,5}$  por 0,6 (véanse apartados anteriores).

**Tabla 4.12** Datos y pendiente CRF *mRAD* (población entre 18 y 64 años)

<b>País</b>	<b>Afectados<sup>1</sup></b> <i>millones</i>	<b><math>f_{\text{POP}}</math></b> %	<b><math>S_{\text{CRF}}^2</math></b> (pendiente) casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$
Brasil <sup>(a)</sup>	46,1	65	$2,23 \times 10^{-2}$
Argentina <sup>(b)</sup>	14,2	46	$1,60 \times 10^{-2}$
Paraguay <sup>(c)</sup>	2,9	46	$1,58 \times 10^{-2}$
Uruguay <sup>(d)</sup>	1,9	56	$1,95 \times 10^{-2}$
<b>TOTAL</b>	<b>65,1</b>	<b>58</b>	<b><math>2,06 \times 10^{-2}</math></b>

<sup>1</sup>Receptores (población empleada de 18 a 64 años) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup> $S_{\text{CRF}} \text{PM}_{\text{sulfatos;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRF}} \text{PM}_{10}$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

(a) Ministerio da Saúde – Brasil: Base de datos Datasus [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

(b) Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

(c) Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. “Anuario Estadístico del Paraguay”, 2009, capítulo “Población y Viviendas”, cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(d) Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004- [www.inecub.uy](http://www.inecub.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

Ahora bien, resulta oportuno resaltar que en el cálculo de los RAD existe un elevado riesgo de solapamiento con otras funciones, lo que podría redundar en doble conteo y, por ende, en una sobrestimación de los impactos. Aunque dicho margen de error sea considerado insignificante, Rabl (2001) recomienda depurar los RAD eliminando las posibles vías de doble conteo y alcanzar así una nueva CRF: Los días de actividad restringida neta (*netRAD*, en adelante). Para ello, es preciso restar del monto total del RAD, los WDL, *mRAD*, admisiones hospitalarias por causas respiratorias (RHA) y cardíacas (CHA). De esta forma, el cálculo de la *netRAD* tuvo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{netRAD} = \text{RAD} - \text{WDL} - \text{mRAD} - \text{RHA} - \text{CHA}$$

*Ecuación 4-15*

Por ello, a partir de la Ecuación 4-15, la CRF para los *netRAD* dispone de la siguiente pendiente:

Función Exposición Respuesta, $S_{CRF}(\text{netRAD})$ [casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ ]	$2,61 \times 10^{-3}$
--	-----------------------

Tras depurar eventuales solapamientos, las CRF definitivas que serán aplicadas en este estudio son los días de actividad restringida menor (*mRAD*) y los días de actividad restringida neta (*netRAD*).

#### 4.3.3.7. Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)

Los ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA<sup>104</sup>, en adelante) es, quizás, la CRF que más aportaciones académicas ha recibido. En este sentido, Rabl (2001) destaca los resultados generados por los proyectos ERPURS<sup>105</sup> y APHEIS<sup>106</sup>, así como las estimaciones derivadas del estudio realizado por Spix *et ál.* (1998). Otros estudios, como los citados en el proyecto ExternE (European Comission, 2005) y en Rabl (2001), también han brindado una amplia fuente de datos tanto de la IRR como de la IL para esta función.

Para este caso de estudio, la **IRR** utilizada ha sido aquella recomendada por el proyecto APHEIS 3 (APHEIS, 2005), que asume el valor de 1,14% por  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ . También se tuvo en cuenta la tasa de incidencia (**IL**) recomendada por este proyecto, que estimó 617 casos<sup>107</sup> por cada 100.000 habitantes. Se optó por utilizar los valores del proyecto APHEIS 3 debido a su gran amplitud, cuya muestra abarcó veintiséis ciudades participantes. Se trata, por otro lado, de uno de los estudios más recientes sobre la materia. Es conveniente resaltar que esta CRF abarca la totalidad de los afectados en la zona de impacto, por lo que la  $f_{\text{pop}}$  es igual a la unidad (100%). Teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente, ha sido posible calcular la pendiente de la función tal como se ilustra en la Tabla 4.13. Conviene resaltar que para hallar la CRF para los sulfatos y nitratos tan solo hay que multiplicar la pendiente calculada para las  $\text{PM}_{10}$  por 1,67.

<sup>104</sup> Respiratory Hospital Admissions (RHA, en inglés).

<sup>105</sup> ERPURS (1997)

<sup>106</sup> APHEIS (2000, 2002, 2005)

<sup>107</sup> Promedio con relación a los valores encontrados para las ocho ciudades europeas estudiadas (Barcelona, Bilbao, Gotemburgo, Londres, Madrid, Sevilla, Estocolmo y Valencia).

**Tabla 4.13** Datos y pendiente CRF - RHA (toda la población)

País	Afectados <sup>1</sup> <i>millones</i>	f <sub>POP</sub> %	S <sub>CRF</sub> <sup>2</sup> (pendiente) casos anuales por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
Brasil <sup>(a)</sup>	71,5	100,0	7,03 x 10 <sup>-6</sup>
Argentina <sup>(b)</sup>	30,8	100,0	7,03 x 10 <sup>-6</sup>
Paraguay <sup>(c)</sup>	6,3	100,0	7,03 x 10 <sup>-6</sup>
Uruguay <sup>(d)</sup>	3,4	100,0	7,03 x 10 <sup>-6</sup>
TOTAL	112,0	100,0	<b>7,03 x 10<sup>-6</sup></b>

<sup>1</sup> Receptores (población total) incluidos dentro de la zona de impacto.

<sup>2</sup> S<sub>CRF</sub> PM<sub>sulfatos,nitratos</sub> = 1,67 x S<sub>CRF</sub> PM<sub>10</sub>

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

(a) Ministerio da Saúde – Brasil: Base de datos Datasus [www.datasus.gov.br](http://www.datasus.gov.br). (Consulta realizada el 30 de marzo de 2011).

(b) Estadística de la población ARGENTINA. Total país. Población por sexo según edad en años simples. Año 2001. Instituto Nacional de Estadística y Censos: [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) (Consulta realizada el 01 de abril de 2011).

(c) Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. “Anuario Estadístico del Paraguay”, 2009, capítulo “Población y Viviendas”, cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(d) Instituto Nacional de Estadística - Censo Fase I 2004-[www.inecub.uy](http://www.inecub.uy) (Consulta realizada el 04 de abril de 2011).

Esta CRF también se aplica para el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), variando solamente en lo que se refiere al valor de la IRR aplicada. En el caso del SO<sub>2</sub>, la IRR recomendada es de 0,04% por µg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> (Rabl, 2001)<sup>108</sup>. Los demás componentes, IL y f<sub>pop</sub>, asumen los mismos valores aplicados para las PM<sub>10</sub>. De esta forma, la pendiente de la CRF para el SO<sub>2</sub> es de **2,47 x 10<sup>-6</sup>** casos por año por persona por µgSO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.3.8. Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)

Los ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA, en adelante), al igual que la RHA, es una función que también ha sido ampliamente estudiada. De forma análoga a los ingresos respiratorios (RHA), los datos utilizados en este caso de estudio también tuvieron en cuenta los resultados del proyecto APHEIS 3 (APHEIS, 2005), que estimó valores muy actualizados con respecto a la IRR<sup>109</sup> (0,6% por 10 µg/m<sup>3</sup>PM<sub>10</sub>) e IL(723 por 100.000 habitantes). En el caso de la IL, el valor encontrado es el promedio entre los valores encontrados para ocho ciudades estudiadas (véase nota nº107). Por último, esta función también abarca la totalidad de los afectados, por lo que el valor de la f<sub>pop</sub> es de 1 (100%).

<sup>108</sup> Valor recomendado por Rabl (2001) a partir del estudio realizado por Spix *et ál.* (1998).

<sup>109</sup> Intervalo de confianza del 95%: 0,3-0,9%

En la tabla que se expone a continuación se presentan los resultados de la pendiente de la CRF, tras aplicar los valores de la **IRR**, **IL** y **f<sub>pop</sub>** mencionados en el párrafo anterior.

**Tabla 4.14** Datos y pendiente CRF - CHA (toda la población)

País	Afectados <sup>1</sup>	f <sub>POP</sub>	S <sub>CRF</sub> <sup>2</sup>
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
Brasil	71,5	100,0	4,34 x 10 <sup>-6</sup>
Argentina	30,8	100,0	4,34 x 10 <sup>-6</sup>
Paraguay	6,3	100,0	4,34 x 10 <sup>-6</sup>
Uruguay	3,4	100,0	4,34 x 10 <sup>-6</sup>
TOTAL	112,0	100,0	<b>4,34 x 10<sup>-6</sup></b>

#### 4.3.3.9. Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa), adultos asmáticos

Los síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa<sup>110</sup>, en adelante) indican básicamente la presencia de asma, reacciones alérgicas u otra infección respiratoria. La CRF asociada con esta afección considera como grupo de afectados los adultos con más de 15 años. El estudio ECRHS<sup>111</sup> (ECRHS, 1996) estimó prevalencias de respiración dificultosa y tos nocturna de un 20,7% y 27,9%, respectivamente, entre adultos. Estos resultados revelan que la tradicional prevalencia de un 30% (afecciones respiratorias crónicas) se trataría de un valor subestimado, dado que el porcentaje podría alcanzar hasta un 50% (AEAT, 2005). De esta forma, con la finalidad de establecer un análisis conservador, se optó por utilizar la prevalencia de un 30%, valor que además suele ser aplicado en estudios de igual naturaleza (AEAT, 2005). Por ello, tal y como se menciona en la Tabla 4.15, la población afectada es un 30% de la población adulta (a partir de 15 años).

Respecto a la IRR, se ha aplicado la tasa de **0,182% por µg/m<sup>3</sup>PM<sub>10</sub>**, extraída a partir del estudio desarrollado por Dusseldorp *et ál.*(1995). Por último, el valor de la **IL** utilizada fue de **91 casos por persona por año**, que tuvo como referencia la recomendación de Rabl (2001). La pendiente resultante de la función y los datos de la población afectada se muestran en la Tabla 4.15.

<sup>110</sup> Lower Respiratory Symptoms – Adults- (LRS, en inglés)

<sup>111</sup> European Community Respiratory Health Survey (ECRHS, en inglés)

**Tabla 4.15** Datos y pendiente CRF - LRSa (adultos > 15 años)

País	Afectados <sup>1</sup>	f <sub>POP</sub> <sup>2</sup>	S <sub>CRF</sub> <sup>3</sup>
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
Brasil	55,0	23	3,82 x 10 <sup>-2</sup>
Argentina	18,1	18	2,92 x 10 <sup>-2</sup>
Paraguay	4,2	20	3,29 x 10 <sup>-2</sup>
Uruguay	2,5	22	3,66 x 10 <sup>-2</sup>
TOTAL	79,8	21	<b>3,59x 10<sup>-2</sup></b>

#### 4.3.3.10. Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos

La CRF relacionada con el uso de medicamentos broncodilatadores (BDUa<sup>112</sup>, en adelante) afecta a la población adulta que presenta síntomas de asma. En un estudio (ECRHS, 1996) realizado en 40 ciudades de Europa y 8 ciudades del resto del mundo, se estimó una prevalencia de asma de un 4,5% sobre la población adulta<sup>113</sup>. De esta forma, con el objetivo de estimar la población afectada en este caso de estudio (f<sub>pop</sub>), se aplicó el porcentaje de un 4,5% sobre la población adulta con más de 15 años (véase Tabla 4.16). En cuanto a la IRR, se utilizó el valor recomendado por Rabl (2001): **0,223% por µg/m<sup>3</sup>PM<sub>10</sub>**. Paralelamente, en la IL también se sigue la recomendación de Rabl (2001), que asume el valor de **28 casos/persona por año**. De esta forma, tras atribuir los valores de la f<sub>pop</sub>, IRR e IL se ha calculado la pendiente de la función, cuyo valor se especifica en la Tabla 4.16.

**Tabla 4.16** Datos y pendiente CRF - BDU (adultos > 15 años)

País	Afectados <sup>1</sup>	f <sub>POP</sub> <sup>2</sup>	S <sub>CRF</sub> <sup>3</sup>
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
Brasil	55,0	3,5	2,16 x 10 <sup>-3</sup>
Argentina	18,1	2,6	1,65 x 10 <sup>-3</sup>
Paraguay	4,2	3,0	1,86 x 10 <sup>-3</sup>
Uruguay	2,5	3,3	2,07 x 10 <sup>-3</sup>
TOTAL	79,8	3,2	<b>2,03x 10<sup>-3</sup></b>

<sup>112</sup>Bronchodilator Usage – Adults- (en inglés)

<sup>113</sup>Promedio de las prevalencias verificadas entre los distintos centros estudiados (ECRHS, 1996).

#### 4.3.3.11. Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos

La CRF para los síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc, en adelante) tuvo en cuenta la población infantil asmática de entre 5 y 14 años. Así, teniendo en cuenta las prevalencias de asma estimadas para la región incluida en el dominio del impacto (ISAAC, 1998), se determinó la población infantil afectada (niños asmáticos entre 5-14 años). El promedio de los valores relacionados con la prevalencia (véase Tabla 4.17) de cada país ha sido aplicado sobre el total de la población infantil entre 5-14 años, obteniéndose de esta manera la población afectada ( $f_{pop}$ ).

**Tabla 4.17** Prevalencias de asma, caso de estudio (%)

País	6-7 años	13 - 14 años	Promedio
Brasil	13,1%	14,9%	14%
Argentina	5,3%	7,3%	6,3%
Uruguay	12%	15,3%	13,65%
Paraguay	-	12,2%	12,2%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ISAAC (1998)

En lo que se refiere a la IRR, se ha utilizado el valor recomendado por Rabl (Rabl, 2001): **0,325% por  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{PM}_{10}$** . En la IL también se tuvo en cuenta el valor de referencia propuesto por Rabl: **30 casos por persona por año**. De esta forma, el cálculo de la pendiente viene dada por la siguiente relación de abajo (Ecuación 4-13), cuyo resultado de la pendiente es presentado en la Tabla 4.18.

$$CRF_{pendiente} = 0,325\% \text{ por } \mu\text{g}/\text{m}^3\text{PM}_{10} \text{ (IRR)} \times 30 \text{ (IL)} \times 1,9\% \text{ (} f_{pop} \text{)}$$

**Tabla 4.18** Datos y pendiente CRF - LRSc (niños entre 5-14 años)

País	Población niños entre 5-14 años <i>Millones</i>	Población afectada Niños asmáticos entre 5-14 años <i>millones</i>	$f_{POP}$ % (% niños asmáticos sobre población total)	$S_{CRF}$
				(pendiente) casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$
Brasil	11,4	1,6	2,2	$2,18 \times 10^{-3}$
Argentina	4,8	0,3	2,3	$9,57 \times 10^{-4}$
Paraguay	1,4	0,2	3,1	$2,63 \times 10^{-3}$
Uruguay	0,5	0,1	2,2	$2,12 \times 10^{-3}$
TOTAL	18,1	2,1	1,9	<b><math>1,89 \times 10^{-3}</math></b>

#### 4.3.3.12. Uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos

De forma análoga a la función anterior, la CRF para los usos de broncodilatadores en niños asmáticos (BDUc, en adelante)<sup>114</sup> tuvo en cuenta las prevalencias de asma verificadas para la región estudiada (véase Tabla 4.17). Partiendo de este principio se calculó la  $f_{pop}$ , que abarca en todo caso la población infantil entre 5-14 años que presenta síntomas de asma. La IRR utilizada en esta función obedece a la recomendación señalada en Rabl (2001) y que, a su vez, ha sido utilizada en el proyecto ExternE (European Commission, 2005): **0,23% por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{10}$** . La IL también atiende a las estimaciones propuestas por Rabl (2001), cuya cantidad de casos asciende a **34** (casos por niños por año). Una vez conocidos los componentes asociados con la CRF, ha sido posible determinar la pendiente de la misma, cuyos valores se muestran en la Tabla 4.19.

**Tabla 4.19** Datos y pendiente CRF - BDUc (niños entre 5-14 años)

País	Afectados <sup>1</sup>	$f_{POP}$ <sup>2</sup>	$S_{CRF}$ <sup>3</sup>
	millones	%	(pendiente) casos anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$
Brasil	11,4	2	$1,75 \times 10^{-3}$
Argentina	4,8	1	$7,68 \times 10^{-4}$
Paraguay	1,4	3	$2,11 \times 10^{-3}$
Uruguay	0,5	2	$1,70 \times 10^{-3}$
TOTAL	18,1	2	<b><math>1,51 \times 10^{-3}</math></b>

#### 4.3.4. Valoración económica – costes unitarios

Establecer un valor monetario es un criterio muy conveniente a la hora de homogeneizar, bajo una sola unidad, todos los impactos generados por la fuente contaminante. De esta forma, el principal objetivo de este apartado es establecer los costes unitarios (UC, en adelante)<sup>115</sup> asociados a cada una de las afecciones sobre la salud humana descritas en el apartado anterior. Hay distintas formas de abordar los costes unitarios, que van desde el coste privado para paliar o tratar una enfermedad (coste del medicamento), el coste “impuesto” sobre la sanidad pública, hasta aquellos resultantes del absentismo laboral y pérdida de productividad, o bien los derivados de estudios de valoración contingente (VC, en adelante). Este último método es el que demanda más tiempo y recursos. Su estimación procura establecer valores a partir de

<sup>114</sup>Bronchodilator usage (en inglés).

<sup>115</sup> Unit Cost (UC), por sus siglas en inglés.

la disposición a pagar (DAP, en adelante) para evitar el “sufrimiento”. Al utilizar la VC se intenta establecer un precio para un determinado bien<sup>116</sup>, que a su vez no es susceptible de valoración por el mercado. En el caso, por ejemplo, de los ingresos hospitalarios, es relativamente fácil establecer un UC puesto que su monto tiene que ver con el coste de una atención sanitaria (coste de un ingreso hospitalario), pero cuando se trata de aspectos como la mortalidad crónica, ¿cómo se valora la pérdida de expectativa de vida? Es por ello que se hace uso de herramientas como la VC que permite determinar un precio para dichos bienes, ofreciendo así información sobre la DAP.

Para estimar económicamente el daño causado sobre la salud humana, el UWM sugiere multiplicar la cantidad de eventos por el UC. Los eventos son los valores de las pendientes encontradas en las CRF mencionadas en el apartado anterior. Son básicamente los casos o eventos por persona por año según el incremento de la concentración de un contaminante. Con relación a los UC, estos representan el coste unitario del daño para cada aspecto estudiado en las CRF (coste de un caso de bronquitis, etc.). Es conveniente resaltar que muchos de estos valores surgen a partir de estudios de valoración contingente, cuya DAP refleja las preferencias individuales para evitar el dolor o sufrir una determinada enfermedad. También se incluyen en la valoración económica otros aspectos como los costes directos de una determinada afección (costes que supone para la salud pública, etc.), salarios en el caso de los RAD, productividad, etc.

Los estudios asociados con la valoración económica<sup>117</sup> de los impactos sobre la salud consumen mucho tiempo y recursos, haciendo que muchas veces no proliferen en países en vías de desarrollo. Por ello, en ocasiones, no es posible encontrar estudios autóctonos que arrojen valores específicos con relación a la DAP para evitar una determinada enfermedad o sufrimiento. Ante esta evidencia, cabe la posibilidad de

---

<sup>116</sup>Los bienes públicos asumen las características de “no exclusión” y “no rivalidad”. La propiedad de “no exclusión” significa que no se puede impedir que otra persona consuma dicho bien. La “no rivalidad” significa que el consumo del mismo no disminuye la cantidad consumida por los demás usuarios.

<sup>117</sup>Devra *et ál.* (2000) mencionan las críticas dirigidas a la valoración económica de los impactos sobre la salud y su consecuente extrapolación a los países de renta más baja. Según este autor, dichas críticas ensalzan el argumento de que al aplicar el BT (en función de la renta) se estaría valorando la vida de un habitante de un país en vías de desarrollo por debajo de la de un individuo que habite en un país desarrollado. Sin embargo, no resulta incoherente pensar, tal y como apuntan Devra *et ál.* (2000), que la mejora de la salud es en realidad una “mercancía”, puesto que a menudo adquirimos bienes o servicios (medicamentos, horas de ejercicio, etc.), cuyo objetivo final es alcanzarla. En este sentido, si la calidad de la salud puede ser considerada como una mercancía, podemos inferir que los individuos tienen una disposición a pagar por ella y, a consecuencia, su demanda variará según la renta. No obstante, conviene señalar que la mejor manera de valorar económicamente las externalidades es disponer de estudios realizados en el país objeto de estudio que fuesen capaces de “captar” otras variables o aspectos, como el nivel cultural, educación, etc., que quedarían subyugadas al aplicar el BT.



transferir valores de otros estudios hacia el país objeto de estudio (Ready & Navrud, 2006 y Markandya, 1998). Transferir dichos valores implica tener en cuenta algunos criterios asociados sobre todo con los niveles de renta entre ambos países. A este procedimiento lo denominamos *benefit transfer* (BT, en adelante), cuyo punto de partida reside en la existencia de estudios previos, pero que han sido realizados en un país ajeno al que se quiere estudiar. Como es de imaginar, ambos países tendrán diferencias tanto en los niveles de renta como en los culturales y socio demográficos. Dichas diferencias suelen ser determinantes, impidiendo de esta manera una simple transferencia directa de valores<sup>118</sup>.

De esta forma, el BT procura transferir los valores de un determinado país donde se realizó el estudio (*policy study*) hacia otro donde se quiera acometer la política (*policy site*). Para ello, tiene en cuenta las diferencias de renta entre ambos con la intención de extrapolar la DAP, que ha sido estimada bajo unos parámetros y realidad económica del país de origen, a un nuevo contexto cuyos niveles de renta difieren del estudio raíz. La principal dificultad vinculada con el BT son las posibles discrepancias entre los niveles de renta (Czajkowski & Ščasný, 2010). Para sopesar este factor, se asume que los resultados para el *policy site* pueden ser estimados ajustando el valor de origen, en función de la ratio entre los dos niveles de renta, expresados en términos de poder adquisitivo per cápita<sup>119</sup> (PPPGDP per cápita, en inglés)<sup>120</sup>. Además, Ready & Navrud (2006) y Czajkowski & Ščasný (2010) señalan que las discrepancias entre los niveles de renta deben ser controladas aplicando la elasticidad-renta de la DAP ( $\gamma$ ). Si este valor es igual a 1,0, significa que la DAP cambiará de forma proporcional según la renta (Devra *et ál.* 2000). De esta forma, si la renta (en términos de PPPGDP per cápita) del país donde se quiera realizar el estudio (*policy site*) es un 50% inferior con respecto a la renta del *policy study*, cabría decir entonces que la DAP en el *policy site* también sería un 50% inferior. No obstante, las evidencias (Devra *et ál.*, 2000; Czajkowski & Ščasný, 2010; Ready and Navrud, 2006) apuntan a que, si bien es cierto que niveles elevados (bajos) de renta confluyen hacia una DAP más alta (baja), dicha relación entre ambos países no es proporcional según

---

<sup>118</sup>Es conveniente señalar que la transferencia directa de valores conlleva la razón implícita de que el bienestar experimentado por un individuo perteneciente a un país A sería el mismo que el del individuo de un país B (Navrud, 2004). Bajo este planteamiento, solo cabría transferir directamente el valor encontrado (ej. DAP para evitar el daño) de una realidad a otra. El principal problema asociado con la transferencia directa es que los individuos de los países A y B pueden tener características socioeconómicas distintas y por ello sus preferencias también serán distintas.

<sup>119</sup>Otra forma de aplicar el factor de ajuste basado en la renta es a través del PIB per cápita. No obstante, según Navrud (2004) & Markandya *et ál.* (2002), la mejor forma de expresar el factor renta es mediante el PPPGDP per cápita, al tratarse de una estimación más coherente con respecto a las preferencias individuales para adquirir un determinado bien.

<sup>120</sup>PPPGDP per cápita: Purchasing Power Parity/Gross Domestic Product, per cápita.

los diferentes niveles de renta. En este sentido, al aplicarse el BT para los UC asociados con la salud humana, se utilizan valores de la elasticidad-renta de la DAP inferiores a 1,0 (Markandya, 1998; Kristrom, 1996; Serôa da Motta *et ál.*, 2000; Markandya & Boyd, 2000; Czajkowski & Ščasný, 2010; Krupnick *et ál.* 1995)<sup>121</sup>. Este supuesto significa suponer que la DAP disminuirá según la renta pero no de forma proporcional. De esta forma, en este caso de estudio se aplicó una elasticidad- renta de la DAP de 0,8 (Ortiz *et ál.* 2011). Cabe apuntar que los márgenes de error que pueden derivar del BT suelen ser inferiores a un factor de 2,0.

Estos postulados son de vital importancia a la hora de establecer los UC, puesto que muchos de ellos derivan de escenarios ajenos a la realidad de los países abordados en este caso de estudio. No obstante, siguiendo con el hilo establecido en el párrafo anterior, se buscará transferir dichos valores hacia la realidad de los países afectados aplicando el factor de ajuste en función de los distintos niveles de renta. En general, la principal fuente de datos relacionada con los UC proviene del proyecto ExternE (European Comission, 2005) y, por ello, se aplicará el BT a partir de los valores europeos a la realidad económica de la región incluida en este caso de estudio (véase Ecuación 4-16).

$$UC_{ce} = UC_{UE} \times \left( \frac{PPPGDP_{per\ cápita\ CE}}{PPPGDP_{per\ cápita-UE27}} \right)^{\gamma}$$

*Ecuación 4-16*

**UC<sub>ce</sub>** es el coste unitario transferido para el caso de estudio (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay). **UC<sub>UE</sub>** es el coste unitario establecido para la Unión Europea (UE-27). El **PPPGDP<sub>per cápita-CE</sub>** es el producto interior bruto per cápita en paridad del poder de compra para el caso de estudio (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay). El **PPPGDP<sub>per cápita-UE</sub>** corresponde a la misma variable para la Unión Europea (27 países). Por último, **γ** es la elasticidad- renta de la DAP.

De esta forma, siguiendo los supuestos mencionados arriba y teniendo en cuenta la Ecuación 4-16, se ha establecido un factor de ajuste que permitirá transferir los costes unitarios europeos a la realidad de los países afectados. Es relevante

<sup>121</sup> Es interesante observar que los estudios realizados en países desarrollados han estimado una elasticidad- renta de la DAP entre 0,35 y 1,0.

mencionar que los efectos de la contaminación atmosférica generados por la central Candiota producen daños en cuatro países (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay), lo que requiere estimar un único factor de ajuste, homogeneizado según los distintos valores del PPPGDP per cápita. Para ello, tras encontrar la ratio entre el PPPGDP per cápita de cada uno de los países con respecto a de la UE-27 y teniendo en cuenta la elasticidad- renta de la DAP (0,8), se aplicó una ponderación según la población afectada. En la Tabla 4.20, se expone el factor de ajuste para el caso de estudio así como los valores utilizados en su estimación. Como alternativa, en esta misma tabla, también se calculó el factor de ajuste teniendo en cuenta el PIB per cápita en vez del PPPGDP per cápita. Pese a que la literatura (Czajkowski & Ščasný, 2010) recomienda utilizar el PPPGDP per cápita como mejor instrumento a la hora de incluir el factor renta, algunos estudios aplican el PIB per cápita.

**Tabla 4.20** Factor de ajuste caso de estudio (2009)

<b>País</b>	<b>PPPGDP<sup>(a)</sup></b> (per cápita) US\$ (2009)	<b>Factor de ajuste</b>	<b>PIB</b> (per cápita) <sup>(d)</sup> US\$ (2009)	<b>Factor de ajuste</b>	<b>Población<sup>(e)</sup></b> (millones)
Brasil	10.464	0,36	8.360	0,29	71,5
Argentina	14.539	0,47	7.733	0,27	30,8
Paraguay	4.565	0,19	2.265	0,10	6,3
Uruguay	13.114	0,43	9.364	0,32	3,4
UE-27	37.296 <sup>(b) (c)</sup>	-	39.456 <sup>(c)</sup>	-	-
<b>TOTAL</b>	-	<b>0,38</b>	-	<b>0,27</b>	112,0

(a) Dólares (precios 2009) por habitante. Fuente: International Monetary Fund, World Economic Outlook Database, September 2011 (Consulta realizada el 16 de enero de 2012). Cabe que resaltar que los valores del FMI son diferentes de los valores calculados por el Banco Mundial.

(b) Fuente: Eurostat - GDP per cápita - Annual Data. Nominal Gross Domestic Product per cápita Purchasing Power Standard per inhabitant (2009 prices). (consulta realizada el 16 de enero de 2012).

(c) Para convertir euros a dólares se utilizó la tasa de cambio en términos de poder adquisitivo de 1,44 US\$/ €. Esta tasa es el promedio entre el valor de la tasa de cambio de poder adquisitivo calculado por la OCDE (1,33 € / US\$), por el Banco Mundial (1,52 € / US\$) y la ratio entre el PPPGDP per cápita Europeo y Estadounidense (1,46€ / US\$). Valores correspondientes al año 2009.

(d) Dólares (precios 2009) por habitante. Fuente: International Monetary Fund, World Economic Outlook Database, September 2011 (Consulta realizada el 16 de enero de 2012).

(e) La fuente de los datos de la población es la misma que la de los datos aplicados en las CRF.

Una vez conocido el factor de ajuste para el caso estudio, tan solo queda multiplicarlo por los distintos UC, llegando así al coste unitario transferido para el caso de estudio. A continuación, se exponen los distintos UC, promoviendo una revisión de los distintos valores estimados hasta la fecha y la correspondiente adaptación a la realidad del caso de estudio. A modo de resumen, en el Anexo 2, se presentan todos los UC para el caso de estudio.

Conviene señalar que los UC aplicados en este estudio tienen como referencia el proyecto ExternE de la Unión Europea, cuyo año base es 2004. De esta manera, antes de aplicar el BT y así encontrar los UC asociados con el caso de estudio, se

debe determinar el valor futuro de los UC aplicando una tasa de descuento estimada para la Unión Europea (NEEDS, 2009); 3%. De esta forma, para estimar el valor futuro de los UC basta introducir la tasa de descuento para la UE en los términos mencionados anteriormente y aplicar la formula general del valor futuro:

$$UC_{UE\ 2009} = UC_{UE\ año} \times (1 + i)^t$$

*Ecuación 4-17*

$UC_{UE\ 2009}$  es el coste unitario actualizado a fecha del 2009;  $UC_{UE\ año}$  es el coste unitario estimado para el año base (ej. 2004);  $i$  es la tasa de descuento;  $t$  es el periodo en años por los que se quiere actualizar el valor base.

#### 4.3.4.1. *Mortalidad infantil (IF)*

Las características de esta función conllevan problemas en lo que se refiere a la valoración económica de la mortalidad infantil por causas respiratorias. Por cuestiones obvias, dicha valoración se fundamenta en la DAP de los padres para reducir los riesgos sobre la salud de sus hijos. En este sentido, se considera que los padres estarían dispuestos a pagar un valor más elevado que el suyo propio para reducir el riesgo de muerte de sus hijos. Así, para encontrar el UC para la mortalidad infantil se establece un factor llamado Tasa Marginal de Sustitución (MRS, en adelante)<sup>122</sup>. El proyecto CAFE (AEAT, 2005), después de llevar a cabo una revisión exhaustiva de una serie de estudios académicos vinculados con la valoración económica de la mortalidad infantil, recomienda utilizar una MRS de 1,5.

En ocasiones, el término VSL o VPF<sup>123</sup> suscita cierta controversia. Es relevante apuntar en este sentido que el concepto de VSL es en realidad simplemente un valor de referencia que indica la DAP de una persona para evitar el riesgo de una muerte prematura. Hay una gran cantidad de estudios que estiman valores para el VSL, mediante diferentes metodologías y enfoques. Los valores más frecuentes suelen variar entre 1 y 5 millones de euros, en función del tipo de metodología empleada. El valor recomendado por el proyecto ExternE (European Comission, 2005) es de 1 millón de euros (2004). Tal y como se ha comentado al principio de este apartado resulta necesario actualizar dicho valor a fecha del 2009 y, posteriormente,

<sup>122</sup> Marginal Rate of Substitution (MRS, por sus siglas en inglés).

<sup>123</sup> VPF: Value of a Prevented Fatality

convertirlo a dólares<sup>124</sup>. Así, siendo el UC estimado para la UE para el año de 2004 del orden de 1.500.000 euros (VSL x MRS), su valor actualizado a 2009 (véase Ecuación 4-17) y convertido a dólares es de US\$ 2.449.808.

Por último, solo queda aplicar el BT utilizando el factor de ajuste de 0,38 con el objetivo de encontrar el valor correspondiente con el caso de estudio (véase Tabla 4.20 y Ecuación 4-16). Para ello, se multiplica el UC estimado para la Unión Europea a fecha de 2009 y convertido a dólares (US\$ 2.449.808) por el factor de ajuste calculado en la Tabla 4.20 , encontrando de esta manera el UC para el caso de estudio: US\$ 928.862. La Tabla 4.21 , presenta los datos y procedimientos utilizados para encontrar el UC para el caso de estudio.

**Tabla 4.21 UC - IF (caso de estudio) 2009**

UC <sub>UE</sub> (2004)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009) **	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
1.500.000€  (VSL x MRS)	US\$ 2.449.808  (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 928.862

\*\* Valor encontrado a partir de la Ecuación 4-17 y según la tasa de descuento estimada para la UE: 3%

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.2. Mortalidad crónica (CM) y mortalidad aguda (MA)

La estimativa del UC para los casos de mortalidad crónica y aguda plantea algunos problemas de carácter metodológico. En primer lugar, es extremadamente difícil determinar la contaminación como causa principal de muerte. De hecho, el proyecto ExterneE (European Commission, 2005) considera la contaminación como causa contributiva de muerte. Por ello, tal y como se dijo anteriormente, se utiliza el concepto de los YOLL a la hora de estimar el daño asociado a la mortalidad crónica.

Si la valoración de la mortalidad atiende al criterio de los YOLL, resulta obligatorio establecer el valor asociado con la pérdida de un año de vida. El método más común utilizado por la literatura utiliza el concepto del valor de un año de vida perdido (VOLY, en adelante)<sup>125</sup>. El método del VOLY supone básicamente convertir el VSL en flujos descontados de años de vida, teniendo en cuenta una tasa social de

<sup>124</sup> Tipo de cambio (2009): 1,44 €/US\$ (Fuente: Eurostat. Euro/ECU exchange rates - Annual data. Consulta realizada el 08 de marzo de 2012).

<sup>125</sup> VOLY (Value of a Life Year, por sus siglas en inglés). VOLY = Value of YOLL.

descuento de entre 3-4%. El proyecto ExternE<sup>126</sup> (European Commission, 2005), fiel a esta metodología, estimó el VOLY en 50.000 euros para la Unión Europea (2004).

Siguiendo el mismo procedimiento explicado en el apartado anterior, es necesario actualizar el VOLY al año 2009 así como convertirlo a dólares. Posteriormente, este valor debe ser ajustado al contexto del caso de estudio a partir del BT (factor de ajuste calculado en la Tabla 4.20). En la Tabla 4.22, se exponen los detalles relativos con el cálculo del UC adaptado a la realidad del caso de estudio.

**Tabla 4.22 UC - CM y MA (caso de estudio) 2009**

UC <sub>UE</sub> (2004)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009) **	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
50.000€	US\$ 81.660 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 30.962

\*\*Valor encontrado a partir de la Ecuación 4-17 y según la tasa de descuento estimada para la UE: 3%

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.3. Bronquitis crónica (CB): Nuevos casos

Los nuevos casos de bronquitis crónica son la segunda función en importancia cuantitativa. Después de la mortalidad crónica, tiene el segundo mayor peso relativo sobre el total del daño. El proyecto ExternE (European Commission, 2005), a partir del estudio desarrollado por Krupnick & Cropper (1992), recomienda utilizar el valor base de 200.000 euros (2004) por cada **nuevo caso** de CB. El estudio desarrollado por Krupnick & Cropper (1992) presenta una serie de valores relacionados con la DAP<sup>127</sup> subdivididos en función de las variantes establecidas en los cuestionarios. Dichos autores establecen un valor para la CB de US\$ 0,4 millón, que tiene su origen al intercambiar el riesgo de padecer CB con el riesgo de muerte. En este sentido, el proyecto ExternE aplica la ratio<sup>128</sup> de un 20% sobre el VSL (1 millón de euros) llegando de esta manera al valor de 200.000 euros para cada nuevo caso de CB. Es conveniente resaltar que el estudio desarrollado por la USEPA (ABT Associates, 2000) estimó el UC en US\$ 330.000 teniendo en cuenta la DAP para evitar dicha enfermedad.

<sup>126</sup>El proyecto ExternE expresa sus resultados en términos de VOLY / YOLL, mientras que estudios previos de externalidades publicados sobre todo en EEUU utilizan el VSL.

<sup>127</sup>El trabajo de Krupnick & Cropper (1992) utilizó una versión modificada del cuestionario desarrollado por Viscusi *et ál.* (1991) con la particularidad de que solamente se les hizo a las personas que afirmaron conocer a alguien que padeciera de bronquitis crónica.

<sup>128</sup>El UC establecido en el trabajo de Krupnick & Cropper (1992) para la CB fue de US\$ 0,4 millón, que representa un 20% del VSL (US\$ 2 millones) considerado en este mismo estudio.

Como se puede observar ambos estudios han llegado a valores muy próximos. En este caso de estudio, se utilizó el valor recomendado por el proyecto ExternE (200.000 euros). De esta forma, siguiendo el mismo procedimiento mencionado en los apartados anteriores, se actualizó dicho valor al año 2009 y se convirtió a dólares. Por último, solo hay que transferir el último valor a la realidad del caso de estudio aplicando el factor de ajuste. El valor del UC se presenta en la Tabla 4.23

**Tabla 4.23** UC - CB (caso de estudio) 2009

<b>UC<sub>UE</sub> (2004)</b>	<b>UC<sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009)</b>	<b>Factor de ajuste</b>	<b>UC<sub>Candiota</sub> (2009)</b>
200.000€	US\$ 326.641 ( <i>tipo de cambio euros a dólares; 1,44</i> )	0,38	US\$ 123.848

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.4. *Días de trabajo perdidos (WDL)*

Los UC vinculados con los días de trabajo perdidos están fundamentados en estudios de absentismo laboral. Estos estudios abordan la estimativa de los costes directos e indirectos asociados a una eventual falta al trabajo. Los costes directos son básicamente aquellos relacionados con la remuneración, reemplazo de personal y pérdida de producción o tiempo de servicio. Por su parte, los costes indirectos se refieren a la mala calidad de un servicio o producto, insatisfacción del cliente y pérdida de oportunidades futuras de negocio (CBI, 1998).

El proyecto ExternE, basándose en las evidencias encontradas en el estudio realizado por la Confederation of British Industry (CBI, 1998), estimó el UC para los WDL en 253€ (2004) por cada día de trabajo. Fiel al mismo procedimiento aplicado en los UC expuestos anteriormente, se ha actualizado dicho valor a fecha del 2009, convertido a dólares y por último se ha transferido al contexto del caso de estudio. La Tabla 4.24 presenta los valores de los UC para el caso de estudio así como los valores y procedimientos utilizados en su cálculo.

**Tabla 4.24 UC – WDL (caso de estudio) 2009**

UC <sub>UE</sub> (2004)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009)	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
253€	US\$ 413 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 157

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.5. *Días de actividad restringida (RAD), días de actividad restringida menor (mRAD) y días de actividad restringida neta (netRAD)*

El proyecto ExternE (European Comission, 2005), según los resultados encontrados en Ready *et ál.* (2004), estimó el UC para los RAD en €148,00 (2003) para tres días de actividad restringida<sup>129</sup>. Para encontrar el valor relacionado con un solo RAD, el proyecto ExternE divide el UC mencionado arriba por tres (€49,00, precios del 2003) e incorpora el valor promedio diario (Europa) asociado con la pérdida de productividad (€88,00). De esta forma, el valor diario recomendado a precios del 2003 es de €137,00. Siguiendo el procedimiento mencionado en los apartados anteriores, se ha actualizado el UC a 2009, convertido a dólares y enseguida transferido al contexto del caso de estudio (factor de ajuste 0,38).

En el caso de los mRAD el proyecto ExternE, también fundamentado en las estimativas realizadas por Ready *et ál.* (2004), recomienda utilizar el valor de €41,00 (2003) por día. Aplicando el mismo procedimiento mencionado en el párrafo anterior, se encontró el UC adaptado a la realidad del caso de estudio y actualizado a 2009. En la Tabla 4.25 se resumen los UC y los datos aplicados en su estimación.

**Tabla 4.25 UC- RAD, netRAD y mRAD (caso de estudio) 2009**

Aspecto de salud	UC <sub>UE</sub> (2003)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009)	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
RAD, netRAD	137€	US\$ 229 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 87
mRAD	41€	US\$ 69 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)		US\$ 26

Fuente: Elaboración propia.

<sup>129</sup> Coste para evitar tres días de actividad restringida.



#### 4.3.4.6. Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) e ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)

El UC para los RHA y CHA es uno de los aspectos de salud más estudiados hasta la fecha. Debido a que la composición de los costes es la misma, el UC asume el mismo valor para los RHA y CHA. Los principales UC vinculados con los RHA y CHA son aquellos identificados en el estudio realizado por Ready *et ál.* (2004) y aplicados en el proyecto ExternE. Según Ready *et ál.* (2004), los costes asociados con una internación de un paciente durante tres días, sumados a otros cinco de reposo en casa, supondrían un coste de aproximadamente €468,00 por cada caso (valor a precios del 2003). Además, a este último valor se añaden las pérdidas de ocho días de productividad por el valor estimado en €704,00 (2003) y los costes de aproximadamente tres días de hospitalización estimados en €969,00 (2003). La combinación de estos factores redundaría en un coste total de € 2.141,00 a precios del 2003.

Actualizar dicho valor a fecha del 2009 y adaptarlo al contexto económico del caso de estudio, requiere el mismo procedimiento mencionado en los apartados anteriores. En la Tabla 4.26 , exponemos los UC actualizados y adaptados a la realidad del caso de estudio.

**Tabla 4.26** UC - RHA y CHA (caso de estudio) 2009

Aspecto de salud	UC <sub>UE</sub> (2003)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009)	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
RHA CHA	2.141€	US\$ 3.586 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 1.360

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.7. Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa) – Adultos- y síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos

Los UC relacionados con los síntomas del tracto respiratorio inferior, tanto para adultos como para niños, tienen la misma característica. Es lógico pensar que, como se trata de los mismos síntomas y conllevan las visitas médicas tras una crisis de asma, los costes deberían ser los mismos independientemente de la edad o sexo del afectado. También es relevante señalar que ambos aspectos no abarcan los

nuevos casos de asma, hecho que seguramente elevaría los costes. Con la intención de realizar un análisis conservador del daño, se optó por seguir la recomendación del proyecto ExternE y aplicar el UC de €38,00 (precios del 2003), que a su vez ha sido derivado del estudio realizado por Netten & Curtis (2000). Este valor tuvo en cuenta los costes asociados a las visitas al médico, en función de la duración de las mismas.

Tal y como se ha señalado en los apartados anteriores, el valor mencionado arriba ha sido actualizado a fecha del 2009, convertido a dólares y posteriormente transferido al contexto del caso de estudio. La Tabla 4.27 resume los valores asociados con este coste unitario.

**Tabla 4.27** UC LRSa y LRSc (caso de estudio) 2009

Aspecto de salud	UC <sub>UE</sub> (2003)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009) <sup>(a)</sup>	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
LRSa LRSc	38€	US\$ 64 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 24

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.8. *Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos y uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos*

El UC relacionado con el uso de broncodilatadores está directamente asociado al coste del medicamento. Por este motivo, no se hace ninguna diferencia entre adultos y niños, ya que el coste no varía con respecto a la edad. El proyecto ExternE (European Comission, 2005) estima que el coste relacionado con el uso del medicamento varía entre € 0,5 a €1,0 por día (precios del 2003), recomendando utilizar el límite superior (€1,0 por día) como valor base. El UC para el caso de estudio ha sido calculado según los procedimientos mencionados en los apartados anteriores. En la Tabla 4.28 , se exponen los UC adaptados a la realidad del caso de estudio.

**Tabla 4.28 UC - BDUa y BDUC (caso de estudio) 2009**

Aspecto de salud	UC <sub>UE</sub> (2003)	UC <sub>UE</sub> (2009) US\$ (2009)	Factor de ajuste	UC <sub>Candiota</sub> (2009)
BDUa BDUC	1€	US\$ 1,7 (tipo de cambio euros a dólares; 1,44)	0,38	US\$ 0,6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.29 , se presentan las pendientes de las funciones concentración-respuesta ( $S_{CRF}$ ) y los costes unitarios (UC) que han sido calculados en los apartados anteriores. Además, los anexos 1 y 2 ofrecen una visión más detallada de ambos parámetros ( $S_{CRF}$  y UC) abarcando las variables aplicadas en su cálculo.

**Tabla 4.29** Resumen de las  $S_{CRF}$  y costes unitarios (UC) calculados para el caso de estudio.

Aspecto de salud	$S_{CRF}$ (pendiente) casos por año por persona por $\mu gPM_{10}/m^3$	UC (US\$ 2009)
<b>Mortalidad infantil (IF)</b>	$2,68 \times 10^{-7}$	928.862
<b>Mortalidad crónica (CM)</b>	$3,76 \times 10^{-4}$	30.962
<b>Mortalidad aguda (AM) SO<sub>2</sub></b>	$1,62 \times 10^{-6}$	30.962
<b>Bronquitis crónica (CB)</b>	$1,46 \times 10^{-5}$	123.848
<b>Días de trabajo perdidos (WDL)</b>	$1,40 \times 10^{-2}$	157
<b>Días de actividad restringida menor (mRAD)</b>	$2,06 \times 10^{-2}$	26
<b>Días de actividad restringida neta (netRAD)</b>	$2,09 \times 10^{-3}$	87
<b>Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)</b>	$7,03 \times 10^{-6}$	1.360
<b>Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)</b>	$4,34 \times 10^{-6}$	1.360
<b>Síntomas del tracto respiratorio inferior Adultos (LRSa)</b>	$3,59 \times 10^{-2}$	24
<b>Uso de broncodilatadores adultos asmáticos (BDUa)</b>	$2,03 \times 10^{-3}$	0,60
<b>Síntomas del tracto respiratorio inferior niños asmáticos (LRSc)</b>	$1,89 \times 10^{-3}$	24
<b>Uso de broncodilatadores niños asmáticos (BDUC)</b>	$1,51 \times 10^{-3}$	0,60
<b>Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) SO<sub>2</sub></b>	$2,47 \times 10^{-6}$	1.360

$S_{CRF}$  para nitratos y sulfatos =  $1,67 \times S_{CRF} PM_{10}$

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.5. Datos meteorológicos

El RUWM requiere el uso de datos meteorológicos para la región donde esté localizada la fuente contaminante. Los datos requeridos por el modelo suponen un proceso relativamente complejo, puesto que abarcan un detallado paquete de informaciones meteorológicas para un año determinado. El *input* final que deberá ser introducido en el modelo requiere datos relacionados con la velocidad (m/s) y dirección (grados) del viento, temperatura (°C), cobertura de nubes, categorías de estabilidad de Pasquill y altura de la capa de mezcla. Estos datos deben incluir todos los días y horas de un año patrón.

Las categorías de estabilidad de Pasquill<sup>130</sup> es una clasificación relacionada con la estabilidad de la baja atmósfera, donde se concentran las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes estáticas. Esta clasificación resulta de fundamental importancia para comprender el comportamiento de la dispersión de los contaminantes. Es decir, dependiendo de la turbulencia de la atmósfera habrá una mayor o menor dispersión de los contaminantes. A efectos prácticos, las categorías de Pasquill clasifican la atmósfera en estable, neutra o inestable, habiendo seis posibles franjas más desglosadas (véase Tabla 4.30)

<b>Tabla 4.30</b> Categorías de estabilidad de Pasquill	
<b>Categorías de Pasquill</b>	
<b>D</b>	<i>Neutral</i>
<b>E</b>	<i>Ligeramente estable</i>
<b>F</b>	<i>Estable</i>
<b>A</b>	<i>Muy inestable</i>
<b>B</b>	<i>Inestable</i>
<b>C</b>	<i>Ligeramente inestable</i>

Fuente: Elaboración propia

La altura de la capa de mezcla<sup>131</sup> ( $h_{\text{mix}}$  en adelante) es la parte de la atmósfera donde ocurre gran parte de las mezclas turbulentas. En ocasiones, cuando la atmósfera es de carácter neutral o inestable, la  $h_{\text{mix}}$  es igual a la capa límite atmosférica<sup>132</sup>. Por otro lado, para atmósferas estables la  $h_{\text{mix}}$  suele ser inferior a la capa límite atmosférica.

<sup>130</sup>Pasquill Dispersion clases (en inglés). Pasquill, F. (1961). *The estimation of the dispersion of windborne material*, The Meteorological Magazine, vol 90, No. 1063, pp. 33-49.

<sup>131</sup>Mixing layer height (en inglés).

<sup>132</sup>La camada límite atmosférica se sitúa en la baja troposfera y su altura suele variar entre 100 y 2.000m. Como es la parte más baja sufre la influencia directa de la superficie.

Tal como se ha mencionado anteriormente, los datos meteorológicos utilizados en este caso de estudio incluyen la temperatura, cobertura de nubes, velocidad y dirección del viento para todas las horas de un año determinado. El dato ha sido facilitado por el programa EnergyPlus-Energy Simulation Software<sup>133</sup> y corresponde a la ciudad de Santa María, situada a 388 kilómetros de Candiota. Conviene resaltar que se optó por utilizar los datos de Santa María porque reúne las mejores características, tanto geográficas como de cercanía, para usarlos en este estudio. Aunque fuese posible obtener dichos datos a partir de las estaciones meteorológicas oficiales brasileñas, los datos facilitados por el Energy Plus abarcan estimativas anuales y valores típicos, eliminando así variaciones y desvíos que puedan ocurrir en un año natural. Para completar el archivo final con los datos meteorológicos, resulta necesario calcular las categorías de estabilidad de Pasquill y la  $h_{mix}$ . En los siguientes apartados, se describirá la metodología asociada al cálculo de estos dos aspectos.

#### 4.3.5.1. *Categorías de estabilidad de Pasquill*

Tal como se ha mencionado anteriormente, las categorías de estabilidad de Pasquill es una convención usada para caracterizar los distintos niveles de estabilidad de la atmósfera. Por ello, existen seis clases diferentes (véase Tabla 4.30) que definen la atmósfera desde “muy inestable” hasta “estable”. Entender la situación de la atmósfera a través de las clases de Pasquill, significa comprender cómo se comportará la dispersión de los contaminantes, variable de extrema relevancia a la hora de estimar los impactos relacionados con la contaminación atmosférica.

Para estudiar y definir las categorías de Pasquill es necesario disponer de las siguientes informaciones: velocidad del viento en metros/segundo, cobertura de nubes<sup>134</sup>, informaciones relativas al momento del día (periodo nocturno o diurno) y el ángulo de altitud solar<sup>135</sup> ( $\alpha$ ). De estos datos, solamente el ángulo de la altitud solar no está disponible en los datos meteorológicos. El ángulo de la altitud solar ( $\alpha$ ) expresa la posición del sol relativa al horizonte<sup>136</sup>, resultando importante por lo tanto para determinar el nivel de insolación. Este parámetro viene dado por la siguiente ecuación (Duffie & Beckman, 1980):

<sup>133</sup> Fuente: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm) (Consulta realizada el 21/07/2011).

<sup>134</sup> Los valores relacionados con la cobertura de nubes varían desde 0 (completamente despejado) hasta 10 (completamente cubierto).

<sup>135</sup> También denominada posición angular del sol respecto al horizonte.

<sup>136</sup> El ángulo de la altitud solar es medido en grados.

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \cos \delta \cos L_{\phi} \cos \omega + \sin \delta \sin L_{\phi} \right)$$

*Ecuación 4-18*

$\alpha$  es el ángulo de la altitud solar en grados ( $\alpha = 90^\circ - \theta_z$ ,  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar).  $\delta$  es el ángulo de declinación del sol en grados, y viene dado por la Ecuación 4-19.  $L_{\phi}$  es la latitud (ángulo en grados).  $\omega$  es el ángulo horario en grados, basado en el tiempo solar, y viene dado por la Ecuación 4-20.

El ángulo de declinación  $\delta$  (grados) del sol viene dado por la Ecuación 4-19.  $n_d$  es el día del año (por ejemplo, 1 de enero es el día 1; 1 de febrero es el día 32, etc.).

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360 (284 + n_d)}{365} \right]$$

*Ecuación 4-19*

El ángulo horario  $\omega$  es el desplazamiento angular del sol de este a oeste. El  $\omega$  asume el valor cero al mediodía solar. Por la mañana (este) asume valores negativos y por la tarde (oeste) positivos. Su valor viene dado por la siguiente ecuación:

$$S_t = S_{loc} + 4 (L_{\theta} - L_{loc}) + E_t$$

$$\omega = 15^\circ (S_t - 12)$$

*Ecuación 4-20*

$S_t$  es el tiempo solar.  $S_{loc}$  es el horario patrón definido por un huso horario.  $L_{\theta}$  es el meridiano estándar para el horario patrón.  $L_{loc}$  es el meridiano local del observador.  $E_t$  es la ecuación del tiempo, que viene dada por la Ecuación 4-21.

La ecuación del tiempo  $E_t$  (expresada en minutos) es la diferencia entre el tiempo solar medio (aquel medido por un reloj convencional) y el tiempo solar aparente (medido por un reloj de sol). En este caso funciona como un factor de corrección ante perturbaciones ocurridas en la rotación de la Tierra. Su cálculo viene dado por la siguiente ecuación:

$$E_t = 9.87 \sin 2 \left[ \frac{360 (n_d - 81)}{364} \right] - 7.53 \cos \left[ \frac{360 (n_d - 81)}{364} \right] - 1.5 \sin \left[ \frac{360 (n_d - 81)}{364} \right]$$

Ecuación 4-21

Una vez calculado el valor del ángulo de la altitud solar ( $\alpha$ ) es posible determinar las categorías de Pasquill, combinándolo con los demás parámetros mencionados en la matriz descrita en la Tabla 4.31.

**Tabla 4.31** Matriz para estimar las categorías de Pasquill

Periodo del día, nivel de insolación y cobertura de nubes	Velocidad del viento (m/s)				
	[< 2]	[2 a < 3]	[3 a < 5]	[5 a < 6]	[> 6]
<b>Periodo diurno</b> <b>[Cobertura de nubes&lt;50%]</b>					
Insolación elevada ( $\alpha > 60^\circ$ )	A	A-B	B	C	C
Insolación media ( $35^\circ < \alpha < 60^\circ$ )	A-B	B	B-C	C-D	D
Insolación ligera ( $\alpha < 35^\circ$ )	B	C	C	D	D
<b>Periodo diurno</b> <b>[Cobertura de nubes&gt;50%]</b>					
Insolación elevada ( $\alpha > 60^\circ$ )	B	B-C	C	D	D
Insolación media ( $35^\circ < \alpha < 60^\circ$ )	B-C	C	C-D	D	D
Insolación ligera ( $\alpha < 35^\circ$ )	C	D	D	D	D
<b>Día o noche</b> <b>[Totalmente cubierto]</b>	D	D	D	D	D
<b>Noche</b>					
Cobertura de nubes > 50%	F	E	D	D	D
Cobertura de nubes < 50%	F	F	E	D	D

Fuente: Spadaro (1999) a partir de Zannetti (1990)

#### 4.3.5.2. Altura de la capa de mezcla ( $h_{mix}$ )

El cálculo de la  $h_{mix}$  es un proceso relativamente complejo, pues se requiere gran cantidad de datos y el uso de una metodología exhaustiva. Spadaro (1999), basándose en los estudios realizados por Van Ulden & Holtslag, (1995) y Zannetti (1990), propuso un esquema para calcular la  $h_{mix}$  (véase Tabla 4.32). Las informaciones requeridas en cada etapa mencionada en la Tabla 4.32 son básicamente las siguientes: (1) *Día y hora de un año de referencia*; (2) *Temperatura*

del aire; (3) Velocidad del viento y altura del anemómetro; (4) Categorías de Pasquill y (5) Ángulo de la latitud.

**Tabla 4.32** Método para estimar la altura de la capa de mezcla ( $h_{\text{mix}}$ )

Estabilidad de la atmósfera (basado en las categorías de Pasquill)	Altura de la capa de mezcla, $h_{\text{mix}}$ para una atmósfera seca
<p><i>Neutral</i> (Pasquill clase D)</p>	$h \approx z_i = 0,20 \frac{u_*}{f}, \quad u_* = 0,40 \frac{u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad f = 2\Omega \sin\phi$ <p><math>h \approx 0,3 u_*/f</math> [Fuente: EPA, 1989]</p>
<p><i>Estable</i> (Pasquill clases E, F)</p>	$h \ll z_i, \quad h \approx 0,4 \sqrt{\frac{u_* L}{f}}, \quad 1/L = a z_0^b$ <p>Pasquill Clase E =&gt; <math>a = 0.00807</math>, <math>b = -0.3049</math>  Pasquill Clase F =&gt; <math>a = 0.03849</math>, <math>b = -0.1714</math></p> $\frac{h}{L} = \frac{0.3 u_*}{1 + 1.9 h/L}$ [Fuente: EPA, 1989]
<p><i>Inestable</i> (Pasquill clases A, B, C)</p>	$h \approx z_i; \quad \gamma - \gamma_d = \frac{\Delta T_0}{h(t)}; \quad \Delta T_0 = T_s(t) - T_s(t_0); \quad \gamma = -\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right _{t_0, z=0}$ <p>[Véase CSIRO modelo simplificado, <a href="http://www.cmar.csiro.au/airquality/mixheight/index.html">http://www.cmar.csiro.au/airquality/mixheight/index.html</a>]</p> $\frac{\partial h}{\partial t} = (1 + 2A) \times \frac{H(t)}{\rho C_p \gamma} \times \frac{1}{h(t)}; \quad A = 0,2$ <p>(Ecuación 27 en EPA, (1989); <math>A = 0,2</math>; contribución convectiva)</p> $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2 B u_*^3 T_s}{g \gamma} \times \frac{1}{h^2(t)}; \quad B = 2,5$ <p>(Ecuación 28 en EPA, (1989); <math>B = 2.5</math>; contribución mecánica)</p> $L = \frac{-\rho C_p u_*^3 \bar{T}}{k g H} \quad u = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m \right]$ <p style="text-align: right;"><math>z = 10</math> metros</p> $\psi_m = 2 \ln \left[ \frac{(1 + \phi_m^{-1})}{2} \right] + \ln \left[ \frac{(1 + \phi_m^{-2})}{2} \right] - 2 \arctan(\phi_m^{-1}) + \pi/2$ $\phi_m = (1 - 15 \frac{z}{L})^{-1/4}$ <p>(para más detalles véase Sección 2.2 en EPA, 1989)</p> <p><b>Nota:</b> <math>h</math> (convectiva) <math>\propto t^{0,5}</math> y <math>h</math> (mecánica) <math>\propto t^{0,33}</math></p>

Fuente: Spadaro (1999), basado en los estudios realizados por Van Ulden & Holtslag (1995) y Zannetti (1990)



### Definiciones de los términos:

<b>h</b>	Altura de la capa de mezcla en metros ( $h_{mix}$ )
<b>k</b>	Constante de Von Karman <sup>137</sup> (0,4)
<b>z</b>	Altura vertical a partir del suelo (m)
<b>z<sub>i</sub></b>	Altura de la camada límite atmosférica (m)
<b>z<sub>0</sub></b>	Longitud de rugosidad <sup>138</sup> (m). Para más detalles véase Anexo 4.
<b>u*</b>	Velocidad de fricción del viento (m/s)[ <i>asumiendo que las condiciones del terreno son uniformes, la existencia de vientos fuertes, la altura del anemómetro es mayor que z<sub>0</sub>, y que la altura de inversión de la temperatura es mayor que h</i> ]
<b>u(z)</b>	Velocidad del viento a una elevación z (m/s)
<b>f</b>	Parámetro de Coriolis [ $f = 2 \Omega \sin L_\phi$ , $\Omega = 7,28 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ que es la tasa de rotación de la Tierra y $L_\phi$ es el ángulo de la latitud en grados]
<b>L</b>	Longitud de Monin-Obukhov (m) [ $L > 0$ para una atmósfera estable]
<b><math>\gamma_d</math></b>	Gradiente adiabático seco <sup>139</sup> [ $\gamma_d = 9.86 \times 10^{-3} \text{ K/m}$ ]
<b><math>\gamma</math></b>	Gradiente atmosférico medido al amanecer (K/m)
<b>t</b>	Periodo del día
<b>t<sub>0</sub></b>	Tiempo del amanecer
<b>T<sub>0</sub></b>	Incremento en la temperatura de la superficie a partir del amanecer hasta el momento t
<b>h(t)</b>	Altura de la capa de mezcla durante el día como una función del tiempo para una atmósfera inestable (m).

De esta forma, para calcular la  $h_{mix}$  se toman como referencia las categorías de Pasquill, calculadas según la metodología expuesta en el apartado anterior. La  $h_{mix}$  asociada a la clase D (atmósfera neutral) viene dada por las ecuaciones descritas en la primera fila de la Tabla 4.32 Para las categorías de Pasquill E y F (atmósfera estable),  $h_{mix}$  adoptará los valores calculados según la ecuación expuesta en la segunda fila. Por último, la  $h_{mix}$  vinculada con las categorías A, B y C (atmósfera inestable) viene dada por las fórmulas mencionadas en la Tabla 4.32 (tercera fila), o bien a partir del modelo simplificado desarrollado por el CSIRO<sup>140</sup>. La segunda opción es relativamente más sencilla que la primera y arroja buenos resultados para la  $h_{mix}$ . De esta forma, debido a la practicidad que ofrece, se optó por estimar la  $h_{mix}$  a partir del método del CSIRO. Para ejecutar el modelo se requieren las siguientes informaciones: (1) *Periodo del año (fecha)*; (2) *Latitud (grados)*; (3) *Tipo de superficie*; (4) *Temperatura del aire (°C)*; (5) *Gradiente de temperatura (°C/m)*; (6) *Cobertura de nubes* y (7) *Velocidad del viento (m/s)*. Los valores de temperatura del aire, cobertura de nubes y velocidad del viento son los promedios mensuales calculados a partir del

<sup>137</sup>La constante de Von Karman, que lleva el nombre del investigador húngaro-americano, es una constante dimensional que describe el perfil de la velocidad logarítmica de un flujo turbulento de fluidos. También es utilizada para modelar la turbulencia (en las capas de la atmósfera) y las mezclas y cambios de calor entre atmósfera y superficie.

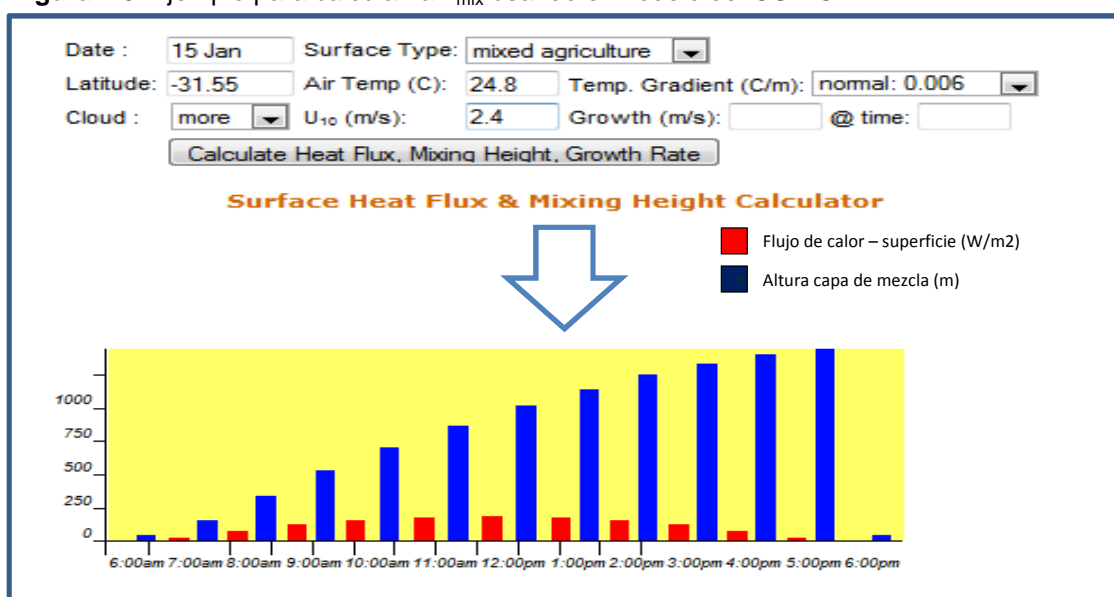
<sup>138</sup>La longitud de rugosidad se relaciona con las características de rugosidad del suelo.

<sup>139</sup>El gradiente adiabático es la variación de temperatura que experimentan las masas de aire en movimiento vertical. Si no se produce condensación en la masa de aire se denomina seco, y es de -10 °C aproximadamente por cada 1000m de elevación. (-1°C/100m). Fuente: Wikipedia. [http://es.wikipedia.org/wiki/Gradiente\\_adiab%C3%A1tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Gradiente_adiab%C3%A1tico) (consulta realizada el 25 de julio de 2011).

<sup>140</sup>CSIRO Marine and Atmospheric Research: <http://www.cmar.csiro.au/airquality/mixheight/index.html> (consulta realizada el 25 de julio de 2011).

archivo de datos meteorológicos facilitados por el Energy Plus-Energy Simulation Software y que han sido utilizado en este caso de estudio. La latitud es de -31,55 (Candiota), el tipo de superficie es de “cultivos agrícolas mixtos” (*mixed agriculture*) y el gradiente de temperatura es “normal 0,006 °C/m”. Así, para ejecutar el modelo y estimar la  $h_{mix}$  es preciso seleccionar dos fechas por mes (días 15 y 30 de cada mes) e introducir los valores medios y demás informaciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, para el mes de enero (15 de enero) se introducen la latitud (-31,55), el tipo de superficie (*mixed agriculture*), el gradiente de temperatura (normal 0.006), la temperatura del aire<sup>141</sup> (24,8°), la cobertura de nubes<sup>142</sup> (*more*) y la velocidad del viento<sup>143</sup> (2,4 m/s). Una vez incorporadas todas estas informaciones, el modelo calcula automáticamente la  $h_{mix}$  (barras azules) para cada intervalo del día<sup>144</sup>, según se muestra en la Figura 4.5, quedando ahora solamente introducir individualmente los valores de cada franja horaria<sup>145</sup> en el archivo de datos meteorológicos para las clases A, B y C. Se seguirá el mismo procedimiento para todos los meses del año, ajustando obviamente los valores medios según la Tabla 4.33

**Figura 4.5** Ejemplo para calcular la  $h_{mix}$  usando el modelo del CSIRO



Fuente: CSIRO. <http://www.cmar.csiro.au/airquality/mixheight/index.html> (consulta realizada el 25 de julio de 2011).

<sup>141</sup> Promedio del mes de enero, véase Tabla 4.33

<sup>142</sup> Promedio de enero: 5,4. Según el baremo mencionado en la tabla (nota “a”) el parámetro a ser introducido en el CSIRO es de *more*.

<sup>143</sup> Promedio de enero: 2,4 m/s (véase Tabla 4.33)

<sup>144</sup> En este caso, los valores de la  $h_{mix}$  serán los mismos para el periodo del 1 al 15 de enero.

<sup>145</sup> Cada franja horaria tendrá así su valor específico.

**Tabla 4.33** Valores medios para el CSIRO

Valores medios para el CSIRO			
Mes	Temp. aire (C)	Velocidad del viento (m/s)	Cobertura de nubes <sup>(a)</sup>
1	24,8	2,4	5,4
2	23,9	2,0	6,5
3	22,4	2,0	6,1
4	20,2	2,1	6,1
5	15,3	2,3	5,9
6	15,3	2,2	6,0
7	15,1	2,4	6,4
8	17,2	2,5	5,7
9	16,3	3,0	6,3
10	19,2	2,7	6,2
11	21,3	3,6	5,9
12	23,9	2,1	6,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos meteorológicos del caso de estudio (Energy Plus-Energy Simulation Software)

(a) Los valores van de 0 a 10, siendo 0 “completamente despejado” y 10 “totalmente cubierto”. Para introducir los valores en el CSIRO, se aplica el siguiente baremo:  
*Clear: 0 a 1 ; Some: 2 a 4 ; more: 4 a 6 ; much: 6 a 8 ; overcast: 9 a 10*

Tras calcular los parámetros relacionados con las categorías de Pasquill, así como de la altura de la capa de mezcla ( $h_{mix}$ ), se dispone ya del archivo final con los datos meteorológicos que deberá ser introducido en el UWM. En la Tabla 4.34 presentamos un ejemplo de parte de los datos meteorológicos utilizados en el caso de estudio.

#### 4.3.5.3. Interpretación de los datos meteorológicos

La composición de los datos meteorológicos permite plantear dos tipos de análisis. En primer lugar, se puede valorar la composición del viento según su dirección y velocidad. Por otro lado, a partir de las categorías de Pasquill, es posible analizar la característica de la atmósfera según su condición de estabilidad.

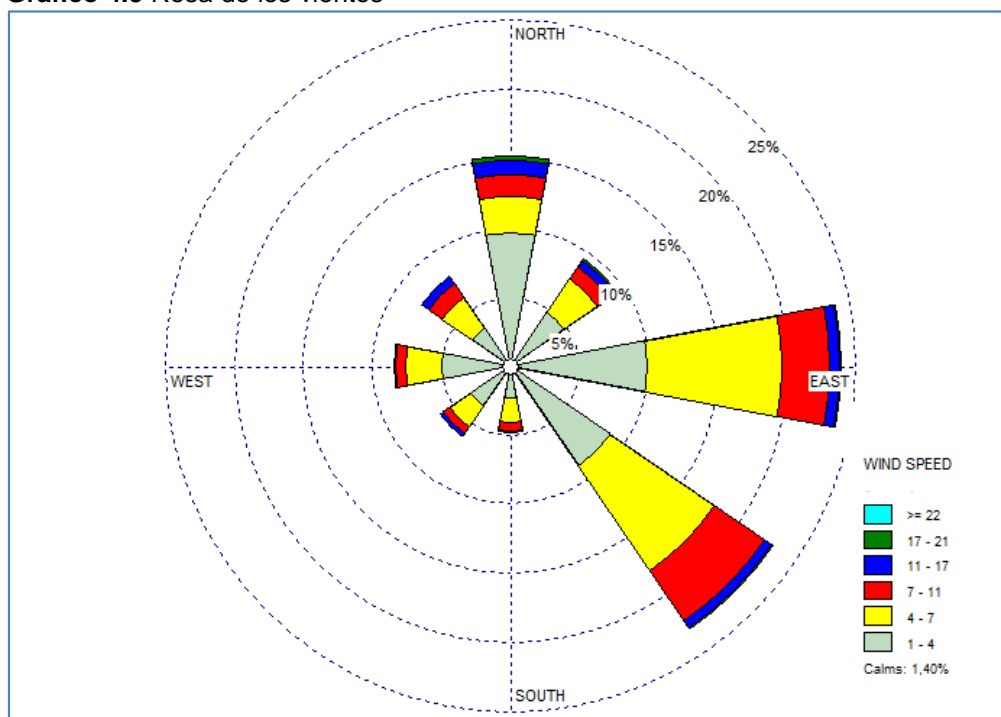
Respecto a las características de los vientos, según se puede observar en el Gráfico 4.5, hay que señalar que son predominantemente de componente este y sureste. Un 24% de la frecuencia de vientos sopla desde el este y un 23% desde el sureste, lo que indica que podría haber transporte de contaminantes hacia el continente. También hay incidencia de vientos del norte y nordeste (un 15% y un 9%, respectivamente). Por otro lado, raramente sopla desde el sur, habiendo poco menos de un 5% de frecuencia.

**Tabla 4.34** Ejemplo de datos meteorológicos utilizados en el caso de estudio.

año	Mes	Día	Horas	Dirección viento (grados)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura del aire (C)	Cobertura de nubes	Angulo de altitud solar $\alpha$	Clases de Pasquill C
1980	1	1	1	0	1,9	16,4	8	-32	F
1980	1	1	2	0	2,2	16,1	8	-26	E
1980	1	1	3	0	2,4	15,7	7	-17	E
1980	1	1	4	0	2,6	15,3	7	-7	E
1980	1	1	5	0	2,9	14,9	6	4	E
1980	1	1	6	0	3,1	14,5	6	16	D
1980	1	1	7	0	3,1	15,3	5	29	D
1980	1	1	8	0	3,1	16,2	5	42	C
1980	1	1	9	180	3,1	17	5	54	C
1980	1	1	10	180	3,1	17,8	5	67	B
1980	1	1	11	180	3,1	18,7	5	79	B
1980	1	1	12	180	3,1	19,5	5	80	B
1980	1	1	13	180	3,1	20,3	4	70	B
1980	1	1	14	180	3,1	21,2	4	57	B
1980	1	1	15	180	3,1	22	4	44	C
1980	1	1	16	180	2,8	21,3	3	32	C
1980	1	1	17	180	2,6	20,7	3	19	C
1980	1	1	18	180	2,3	20	1	7	F
1980	1	1	19	180	2	19,3	1	-5	F
1980	1	1	20	180	1,8	18,7	1	-15	F
1980	1	1	21	270	1,5	18	0	-24	F
1980	1	1	22	270	1,6	17,9	0	-31	F
1980	1	1	23	270	1,7	17,8	0	-35	F
1980	1	1	24	270	1,8	17,7	0	-36	F

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.5** Rosa de los vientos

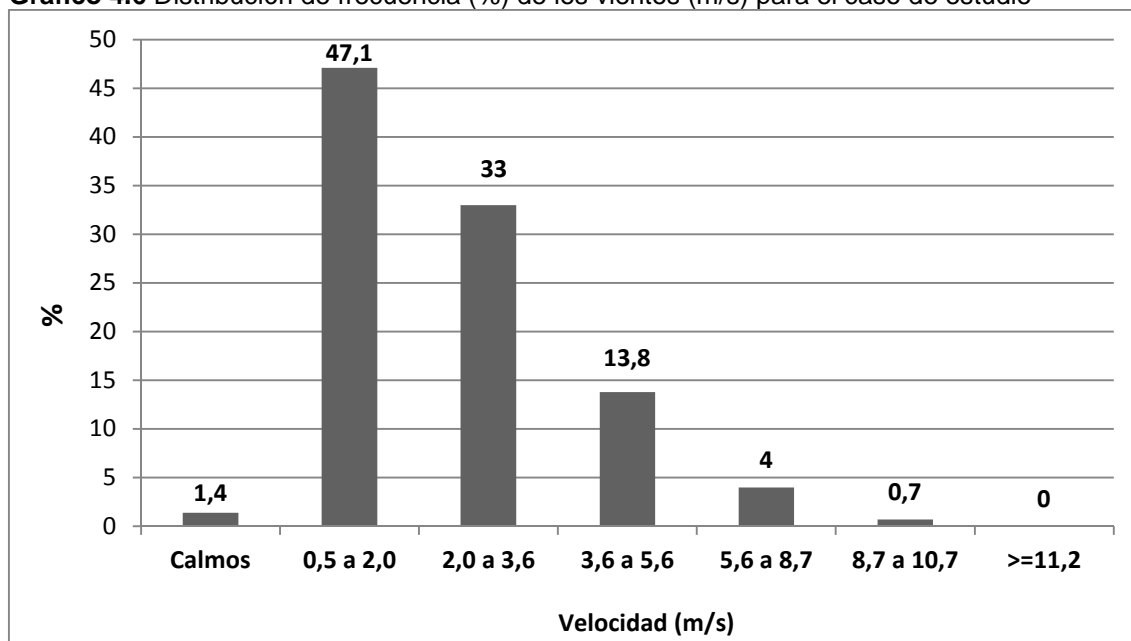


Fuente: Elaboración propia usando el sistema WRPlot View<sup>146</sup> y a partir de los datos meteorológicos utilizados para el caso de estudio

El Gráfico 4.5 también permite evaluar la composición del viento respecto a su velocidad. Así, aproximadamente un 20% de los vientos de componente este soplan a velocidades entre 1 y 7 m/s (un 9,9% entre 1-4 m/s y un 9,6% entre 4-7 m/s). Algo parecido ocurre con los vientos de componente sureste, los cuales durante un 8,7% del tiempo soplan con velocidad entre 1-4 m/s y un 9,1% entre 4-7 m/s. De esta forma, los datos relacionados con la velocidad del viento para la región del caso de estudio demuestran que estos no tienen características de vientos excesivamente fuertes, dado que durante un 47% del tiempo soplan con velocidad entre 1-4 m/s y un 33% entre 4-7 m/s. Los vientos con velocidad comprendida entre 7-11 m/s tuvieron una frecuencia aproximada de un 14% del tiempo (véase Gráfico 4.6). En el Anexo 5: se presentan los datos relativos a las clases de frecuencia de los vientos según su dirección y velocidad. Además, a partir del análisis del Gráfico 4.5 podemos observar que la contaminación tiende a ser transportada lejos de la población principal.

<sup>146</sup>Fuente: <http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html> (consulta realizada el 27 de julio de 2011).

**Gráfico 4.6** Distribución de frecuencia (%) de los vientos (m/s) para el caso de estudio



*Nota: Vientos calmos: aquellos cuyas velocidades están por debajo 0,5 m/s*

Fuente: Elaboración propia usando el sistema WRPlot View y a partir de los datos meteorológicos utilizados para el caso de estudio

Otra forma de interpretar los datos meteorológicos es analizar la distribución de las categorías de Pasquill con la intención de determinar el perfil general de la atmósfera para la región estudiada. Tal como se ha podido observar anteriormente, a partir de los datos meteorológicos primarios se han estimado las clases de Pasquill para la región del caso de estudio. Se observa, en este sentido, que predominan las clases de Pasquill D (46% de las incidencias) y F (29%) indicando que se trata de una atmósfera con carácter predominantemente neutral o bien estable (véase Tabla 4.35).

**Tabla 4.35** Distribución (%) de las categorías de Pasquill

Categoría de Pasquill	nº de incidencias	%
Muy inestable (Pasquill A)	162	2%
Inestable(Pasquill B)	703	8%
Ligeramente inestable(Pasquill C)	820	9%
Neutra(Pasquill D)	3.991	46%
Ligeramente estable(Pasquill E)	548	6%
Estable(Pasquill F)	2.536	29%
<b>Total</b>	<b>8.760</b>	<b>100%</b>

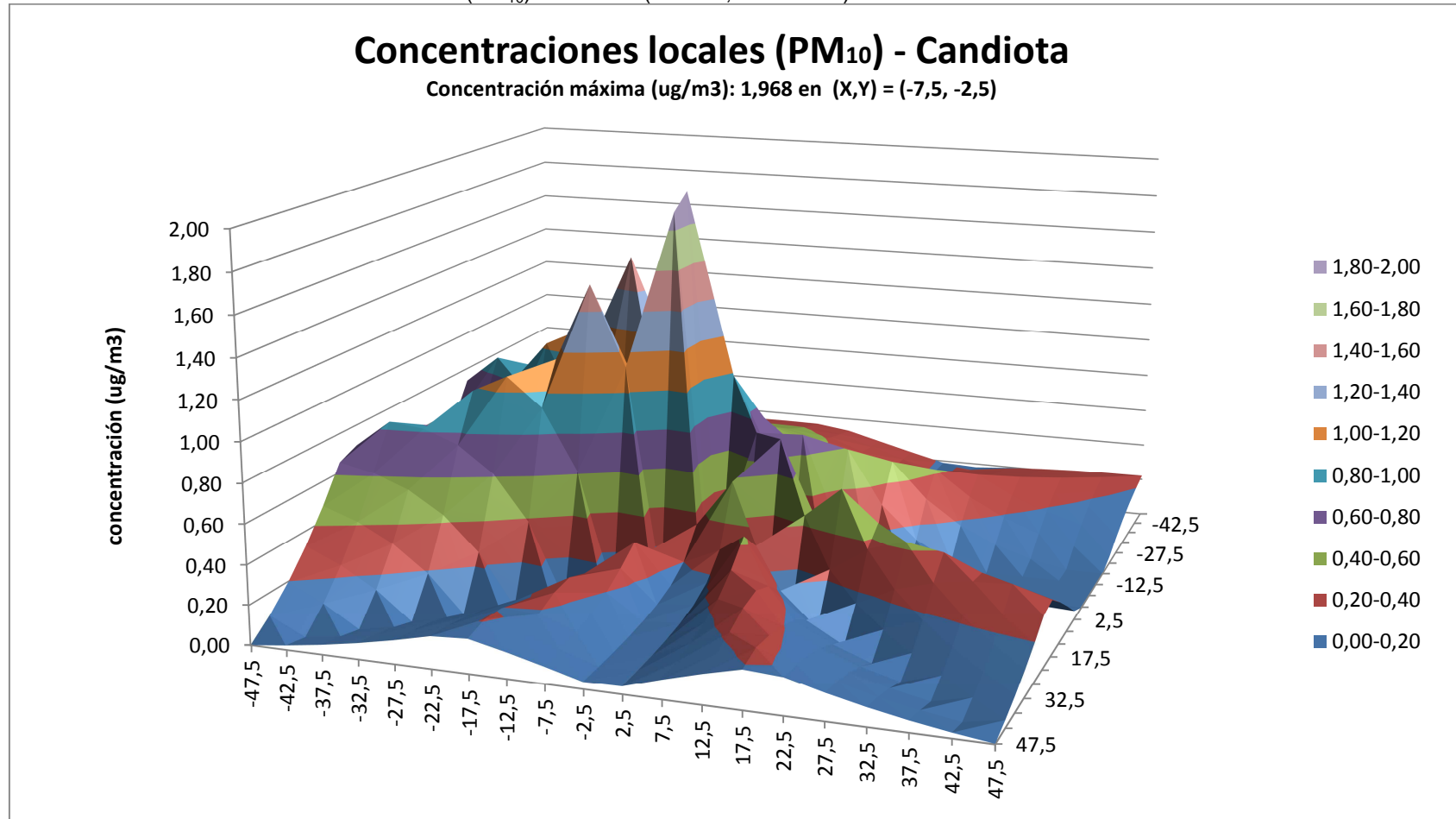
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos meteorológicos utilizados para el caso de estudio.

#### 4.3.5.4. *Concentraciones a escala local*

Como se ha mencionado al principio de este capítulo, el UWM permite simular las concentraciones de los contaminantes a escala local (zona de impacto con radio inferior a 50km a partir de la fuente emisora). De esta forma, se puede observar en los gráficos 4.7, 4.8 y 4.9 los niveles de concentración, expresados en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para la región del municipio de Candiota. Los valores que aparecen en el eje horizontal son medidas en km a lo largo de las direcciones horizontal y vertical, siendo la fuente ubicada en el punto 0,0. El eje vertical mide las concentraciones de cada uno de los contaminantes. Además, se señala el punto de concentración más alta para cada uno de los contaminantes.

Por último, conviene resaltar que las concentraciones aquí representadas son valores aproximados cuyo interés fundamental es ofrecer una idea con respecto al estado de la cuestión y apoyar al planificador en la toma de decisiones. Dichas distribuciones no son por lo tanto el producto de modelos de dispersión detallados.

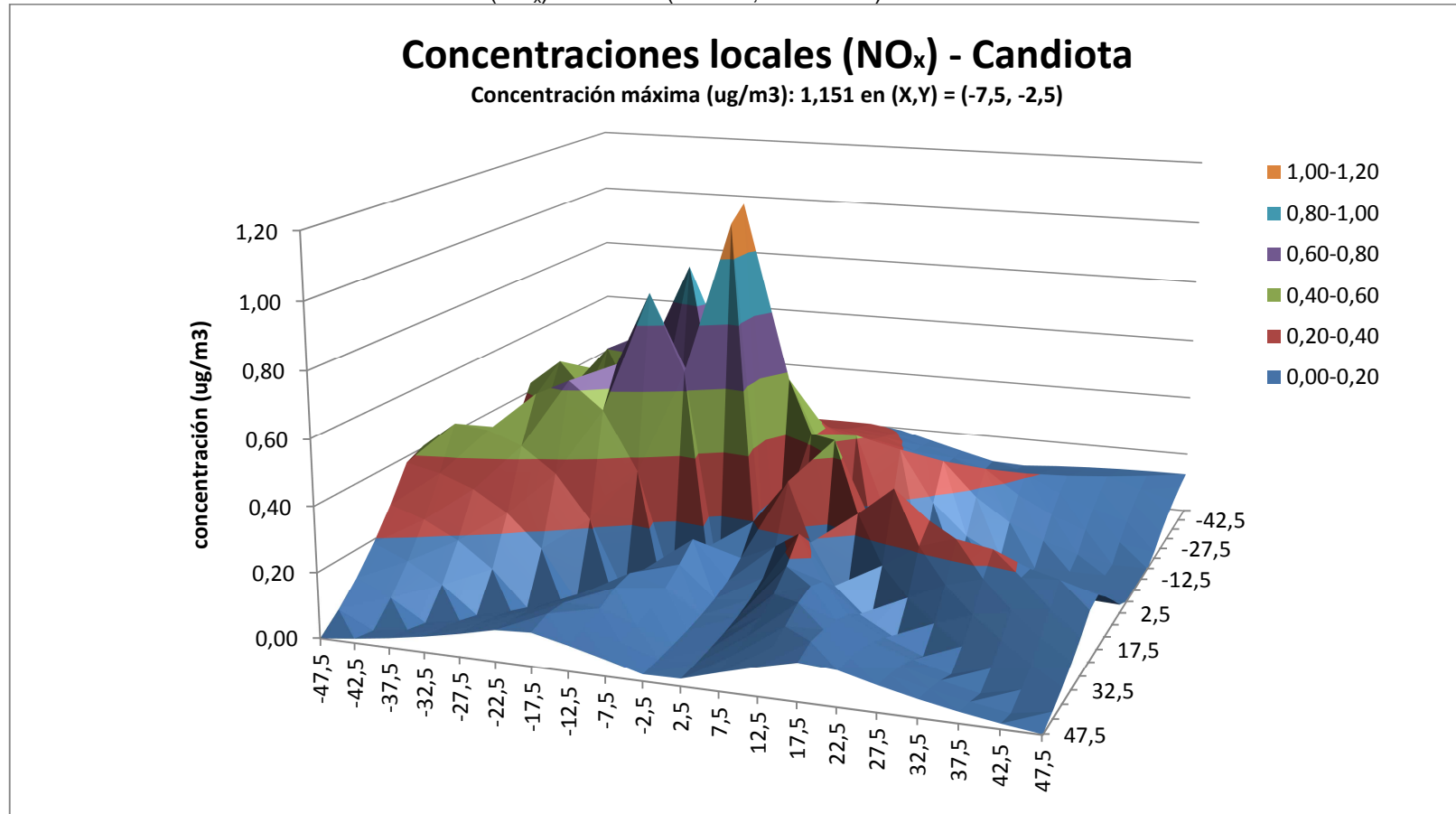
**Gráfico 4.7** Concentraciones a escala local (PM<sub>10</sub>). Candiota (5x5 km; resolución) CONDITION FORMAT



Fuente: Elaboración propia.

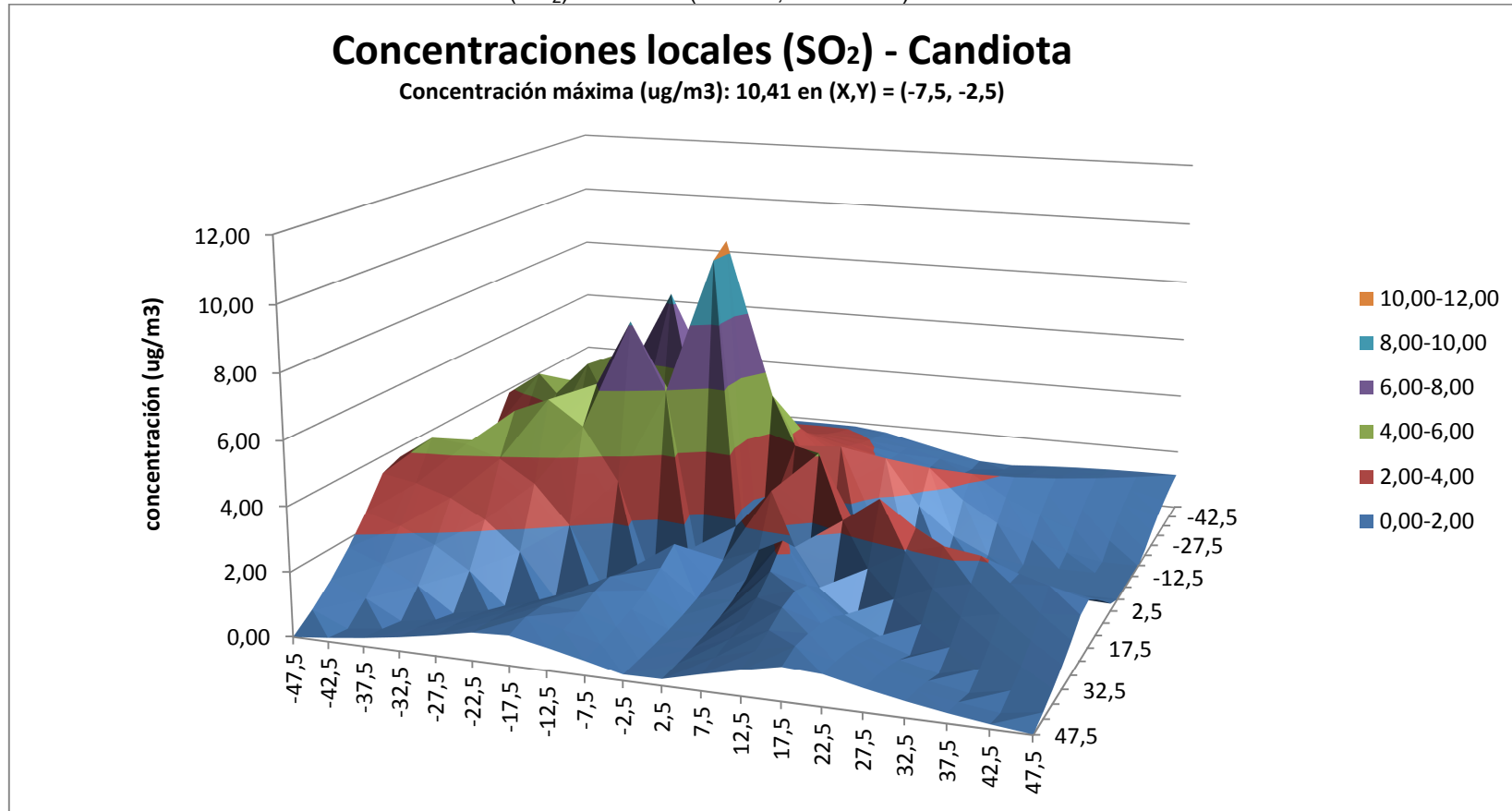


**Gráfico 4.8** Concentraciones a escala local ( $\text{NO}_x$ ). Candiota (5x5 km; resolución)



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.9** Concentraciones a escala local (SO<sub>2</sub>). Candiota (5x5 km; resolución)



Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 5 : Resultados**

## 5.1. Introducción

En el capítulo anterior se han revisado los aspectos metodológicos del UWM, así como los parámetros (datos de entrada) que fueron requeridos por el modelo. De esta forma, tras haber estudiado todas las informaciones necesarias para la ejecución del UWM, se pasará al análisis de los resultados asociados con la valoración económica de las externalidades causadas por la central termoeléctrica de Candiota.

Antes de presentar los resultados, resulta oportuno repasar los requerimientos que han sido exigidos por el UWM para realizar la estimación de los impactos. Dichos postulados han sido resumidos en la Tabla 5.1 . Conviene apuntar que uno de los puntos fundamentales a la hora de valorar económicamente el impacto sobre la salud humana es determinar la cantidad de casos asociados con cada aspecto de salud. Para ello, tal y como se ha dicho anteriormente, el UWM hace uso de las funciones concentración-respuesta (CRF), cuyo objetivo es identificar la relación entre contaminación e impacto sobre la salud, obteniendo así el número de casos<sup>147</sup>. No obstante, para homogeneizar el impacto bajo una sola unidad (coste en unidades monetarias) se requiere multiplicar el número de casos por su respectivo coste unitario.

Determinar un valor económico para cada aspecto de salud reviste una importancia fundamental. Por un lado, como uno de los objetivos que se propone esta investigación es analizar las distintas alternativas hacia la mitigación de los impactos, los costes externos podrían servir de pauta al planificador para decidir qué tecnología aplicar para reducir el daño. Este ejercicio podría ayudar a contrastar las externalidades sobre la salud, expresadas en unidades monetarias, con los costes de la inversión que redundarían a partir de un eventual cambio tecnológico o de la introducción de medidas mitigadoras. De esta forma, en este apartado se expondrán los resultados asociados con la valoración económica de las externalidades tanto en términos de daños sobre la salud humana como también de los efectos del cambio climático.

---

<sup>147</sup> Por otro lado, el análisis del impacto a través del número de casos resulta de poca utilidad práctica en un estudio de estas características, debido a que no permite establecer parámetros de comparación de carácter monetario.

**Tabla 5.1** Resumen de los datos requeridos por UWM para ejecutar el análisis del caso de estudio de Candiota

A) Parámetros de la fuente							
Nombre: Central termoeléctrica Presidente Médici			Longitud: 53,68° Latitud: 31,55°			Potencia (MW): 446	
Altura de la chimenea (m): 150	Diámetro de la chimenea (m): 2		Combustible: Carbón bituminoso Carbono fijo: 27,2 % Consumo (2009): 1.215.000 t/año				
Velocidad de salida de los gases (m/s): 20	Temperatura de salida de los gases (K): 420			Energía eléctrica generada en 2009 (MWh): 900.410			
D) Emisiones (t/año)				Eficiencia térmica: 20%			
PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	B) Distribución de la población (personas/km <sup>2</sup> )			
5.226	27.654	3.058	1.200.855	Local: 3		Regional: 36	
(g/kWh)				C) Depletion Velocity (cm/s) - Zona de impacto			
PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	Sulfatos	Nitratos
5,8	30,7	3,4	1.350	1,46	1,20	3,25	1,32
E) Funciones Concentración Respuesta (CRF) y Costes Unitarios (UC)							
CRF			S <sub>CRF</sub> (pendiente)				UC (US\$ 2009)
Mortalidad infantil (IF)			2,68 x 10 <sup>-7</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				928.862
Mortalidad crónica (CM)			3,76 x 10 <sup>-4</sup> YOLL anuales por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				30.962
Mortalidad aguda (AM) SO <sub>2</sub>			1,62 x 10 <sup>-6</sup> casos por año por persona por µgSO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>				30.962
Bronquitis crónica (CB)			1,46 x 10 <sup>-5</sup> nuevos casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				123.848
Días de trabajo perdidos (WDL)			1,40 x 10 <sup>-2</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				157
Días de actividad restringida (RAD)			6,48 x 10 <sup>-2</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				87
Días de actividad restringida menor (mRAD)			2,61 x 10 <sup>-3</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				26
Días de actividad restringida neta (netRAD)			2,09 x 10 <sup>-3</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				87
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)			7,03 x 10 <sup>-6</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				1.360
Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)			4,34 x 10 <sup>-6</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				1.360
Síntomas del tracto respiratorio inferior Adultos (LRSa)			3,59 x 10 <sup>-2</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				24
Uso de broncodilatadores adultos asmáticos (BDUa)			2,03 x 10 <sup>-3</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				0,60
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños asmáticos (LRSc)			1,89 x 10 <sup>-3</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				24
Uso de broncodilatadores niños asmáticos (BDUc)			1,51 x 10 <sup>-3</sup> casos por año por persona por µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>				0,60
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) SO <sub>2</sub>			2,47 x 10 <sup>-6</sup> casos por año por persona por µgSO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>				1.360
Cambio climático							US\$/tCO <sub>2</sub>
Emisiones de CO <sub>2</sub>							52

Nota:  $S_{CRF}$  sulfatos, nitratos=  $1,67 \times S_{CRF} PM_{10}$

Fuente: Elaboración propia.

Este capítulo está estructurado en dos partes. La primera presenta los resultados encontrados para el caso de estudio, según diferentes perspectivas. En

esta parte se presentarán los daños sobre la salud humana expresados en términos monetarios y repartidos según los aspectos de salud (mortalidad y morbilidad), o bien, según los costes marginales del daño: coste por KWh de energía generada o coste por kilogramo de contaminante emitido por la central. También en este apartado se presentarán los resultados asociados con el cambio climático; emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La segunda parte de este capítulo presenta los análisis de incertidumbre y sensibilidad.

## Parte I: Resultados

### 5.2. Impactos sobre la salud humana

Cuando el objetivo sea incorporar las externalidades como herramienta de decisión resultará fundamental estimarla en términos monetarios. El valor económico de las externalidades o costes externos se obtiene tras multiplicarse el número de casos de un determinado aspecto de salud por su correspondiente coste unitario (ej. coste por cada nuevo caso de bronquitis). De esta manera, los resultados pueden ser expresados en términos monetarios permitiendo compararlos con distintas alternativas de inversión que, a su vez, podrían reducir el daño.

En el Gráfico 5.1 , se puede observar el coste marginal por kilogramo según el tipo de contaminante. Observamos, en este sentido, que el  $\text{NO}_x$  es el contaminante que dispone del coste marginal por kg más alto (US\$ 2,5/kg), debido a los efectos de los nitratos<sup>148</sup>.

Las partículas  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{SO}_2$  generan costes marginales de US\$ 1,0/kg y US\$1,04/kg, respectivamente. Conviene señalar que el  $\text{SO}_2$  impacta por dos vías: a través de sus efectos directos, o bien por medio de los sulfatos, proviniendo la práctica totalidad de los impactos de los sulfatos.

En la Tabla 5.2 , ofrecemos los resultados globales de esta investigación. En los apartados que siguen trataremos cada uno de estos resultados con más detenimiento.

---

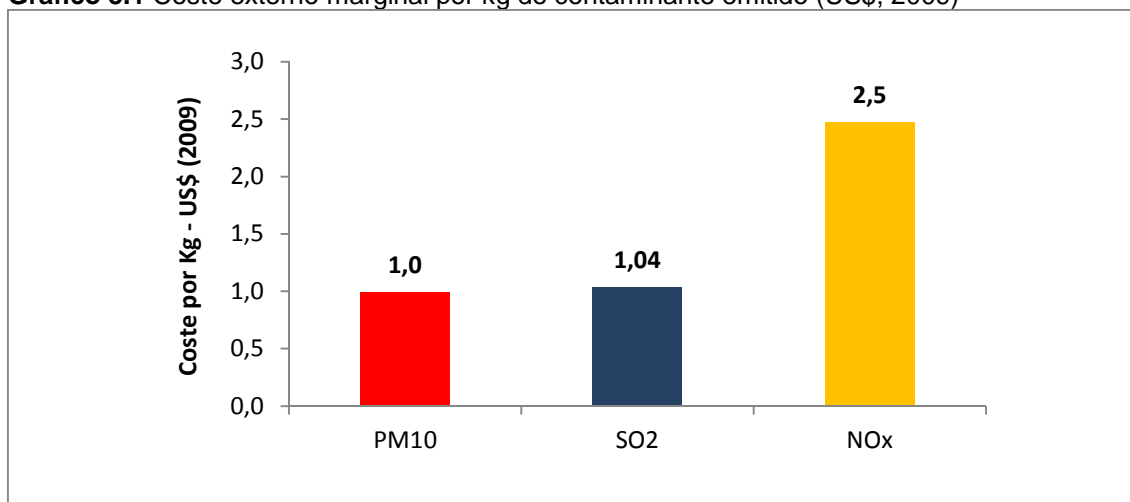
<sup>148</sup> Como se ha visto anteriormente, los efectos directos de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) son considerados nulos. En este caso, los costes externos asociados con el  $\text{NO}_x$  ocurren debido a los efectos de los nitratos (secundarios) ocasionados por las emisiones directas del  $\text{NO}_x$ .

**Tabla 5.2** Resultados globales del caso de estudio

Aspecto de salud	PM <sub>10</sub>		SO <sub>2</sub>		Nitratos		Sulfatos		Total	
	Casos /año	k\$2009 /año	Casos /año	k\$2009 /año	Casos /año	k\$2009 /año	Casos /año	k\$2009 /año	Casos /año	k\$2009 /año
<b>Mortalidad</b>										
Mortalidad crónica (CM)	103	3.186	-	-	150	4.654	568	17.596	822	25.435
Mortalidad aguda (MA)	-	-	3	96	-	-	-	-	3	96
Mortalidad infantil (IF)	0,001	1	-	-	0,001	1	0,004	4,0	0,006	6
<b>Morbilidad</b>										
Bronquitis crónica (CB)	4	515	-	-	6	752	23	2.842	33	4.109
Días de trabajo perdidos (WDL)	4.079	639	-	-	5.925	928	22.410	3.511	32.414	5.078
Días de actividad restringida menor (mRAD)	5.859	153	-	-	8.553	223	32.340	842	46.752	1.217
Días de actividad restringida neta (netRAD)	4.791	417	-	-	6.976	607	26.380	2.295	38.147	3.319
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	2	3	-	-	3	4	11	14	15	21
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	1	2	-	-	2	2	7	9	9	13
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	10.240	247	-	-	14.930	360	56.470	1.363	81.640	1.970
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	580	0,4	-	-	843	0,5	3.189	2,0	4.613	2,9
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	534	13	-	-	777	19	2.936	71	4.246	102
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	427	0,3	-	-	624	0,4	2.358	1,5	3.409	2,2
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO <sub>2</sub>	-	-	4	6	-	-	-	-	4	6
<b>Total coste externo (k\$2009/año)</b>										
Mortalidad	-	3.187	-	96	-	4.655	-	17.600	-	25.537
Morbilidad	-	1.989	-	6,1	-	2.895	-	10.951	-	15.841
Cambio climático (CO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62.444
<b>Coste externo total</b>	<b>-</b>	<b>5.175</b>	<b>-</b>	<b>102</b>	<b>-</b>	<b>7.550</b>	<b>-</b>	<b>28.550</b>	<b>-</b>	<b>103.822</b>
<b>Coste externo marginal</b>										
Electricidad (GWh/año)	900,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emisiones (toneladas/año)	5.226	-	27.654	-	3.058	-	27.654	-	-	-
\$ por kg emisión	-	1	-	0,004	-	2,5	-	1,0	-	-
US\$ por MWh	-	6	-	0,1	-	8,0	-	32	-	-
<b>Distribución geográfica del coste externo (%)</b>										
<b>Local</b>	1%				<b>Regional</b>				99%	

Fuente: Elaboración propia

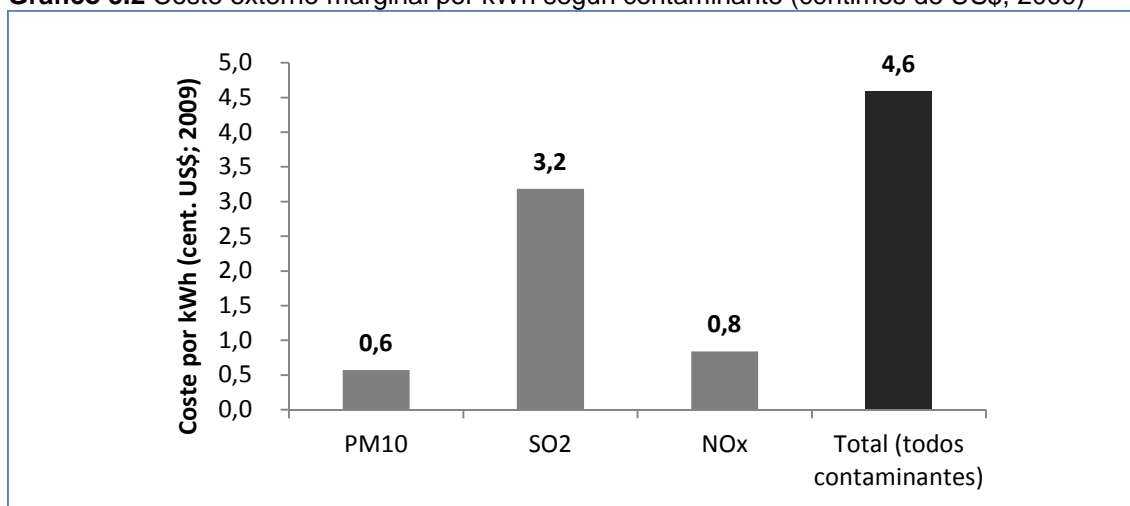
**Gráfico 5.1** Coste externo marginal por kg de contaminante emitido (US\$, 2009)



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 5.2 muestra que el coste por unidad de energía eléctrica generada asciende a 4,6 céntimos de dólar por kWh (US\$ 46 por MWh)<sup>149</sup>. En este caso, el SO<sub>2</sub> dispone del coste marginal más elevado: 3,2 céntimos de dólar por kWh. El NO<sub>x</sub> y las partículas (PM<sub>10</sub>) generan 0,8 y 0,6 céntimos de dólar (2009) por kWh, respectivamente.

**Gráfico 5.2** Coste externo marginal por kWh según contaminante (céntimos de US\$, 2009)



Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.1. Costes externos según la zona de impacto: local y regional

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la localización de la central (rural) corrobora las evidencias detectadas por Spadaro (2011), que señala que en

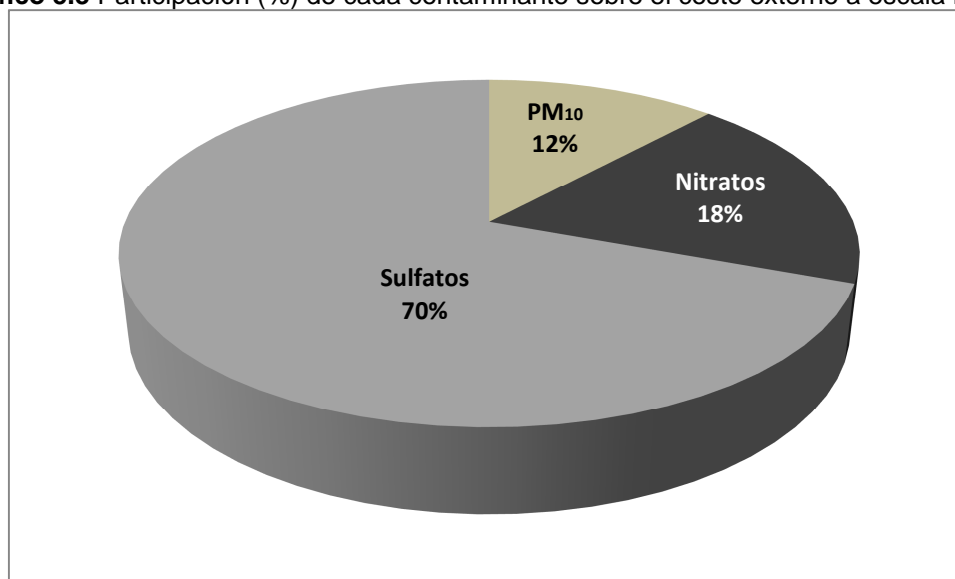
<sup>149</sup>En 2009 la Central Termoeléctrica de Candiota generó 900GWh.



situaciones donde la fuente esté localizada en una zona rural los efectos a escala local no serían tan influyentes. En la Tabla 5.3 , podemos observar que gran parte del impacto (99%) se restringe a escala regional (radio 1.000km) y una pequeña parte al dominio local (zona con radio inferior a 50km). Los sulfatos y nitratos, debido a que se combinan a kilómetros de distancia de la fuente donde fueron emitidos sus precursores y también debido a las elevadas tasas de emisión verificadas, son los principales responsables de los efectos a escala regional. A escala local, el impacto explica menos del 1% del daño y básicamente se restringe a las partículas ( $PM_{10}$ ). No obstante, este hecho no quiere decir que sean nulos o que la población no sufra con la contaminación, simplemente significa que los receptores a nivel local son menos y más esparcidos con respecto al nivel regional.

A nivel regional los sulfatos responden a un 70% del coste externo total, mientras que los nitratos y  $PM_{10}$  suponen un 18% y 12%, respectivamente (véase Gráfico 5.3 ).

**Gráfico 5.3** Participación (%) de cada contaminante sobre el coste externo a escala regional

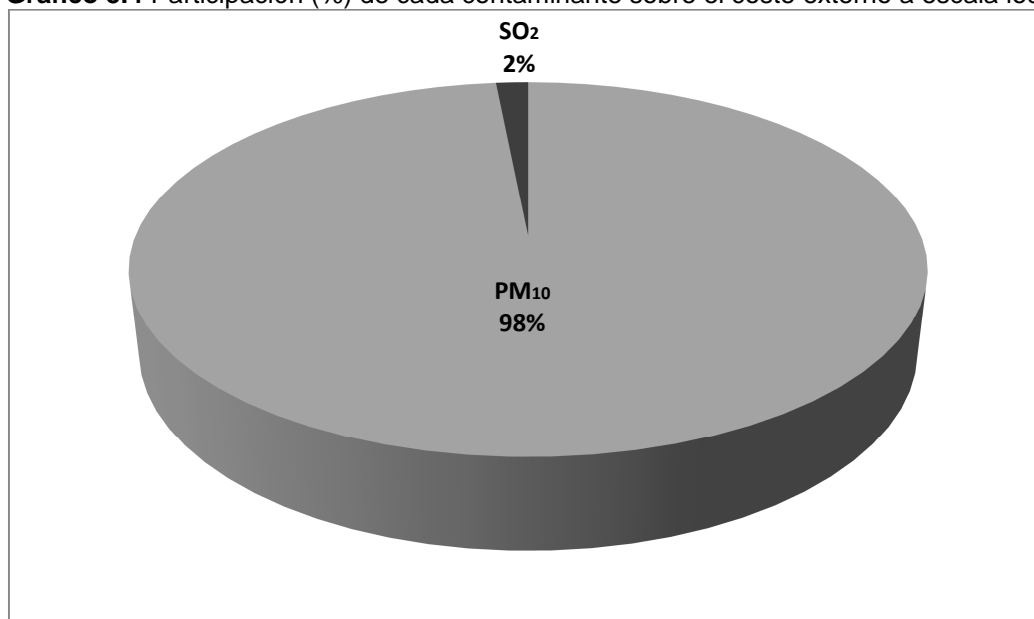


Fuente: Elaboración propia

Localmente, las  $PM_{10}$  son el contaminante que más costes externos genera (98%), seguido del  $SO_2$  con un 2% (véase Gráfico 5.4 ). En la Tabla 5.3 podemos visualizar la distribución del coste externo según el sitio donde se produce el impacto y por aspecto de salud. Cabe destacar en este sentido (véase Tabla 5.3 ), que los compuestos secundarios (nitratos y sulfatos) no producen efectos a escala local. El  $SO_2$  (efecto directo) concentra un 96% del impacto a escala regional, siendo solo la

mortalidad aguda (MA) responsable de un 90% de dicho impacto y las admisiones hospitalarias respiratorias (RHA) de un 6%.

**Gráfico 5.4** Participación (%) de cada contaminante sobre el coste externo a escala local



Fuente: Elaboración propia

De esta forma, como la central de Candiota está ubicada en una zona rural cuya densidad poblacional es relativamente reducida (3 personas por km<sup>2</sup>), los impactos de las partículas (PM<sub>10</sub>) son proporcionalmente inferiores si se comparan con una central localizada en una zona urbana. Cabe resaltar que si se ubicara cerca de un gran centro poblacional los efectos de las PM<sub>10</sub> explicarían un porcentaje mayor del daño. Este hecho será tratado más adelante en el análisis de sensibilidad.

En la Tabla 5.3 presentamos la distribución del coste externo según el dominio del impacto: local o regional.

**Tabla 5.3** Distribución (%) del coste externo según la zona de impacto (local/regional)

	Aspecto de salud	Local		Regional		Total	
		kUS\$ (2009)	%	kUS\$ (2009)	%	kUS\$ (2009)	%
Sulfatos	Mortalidad crónica (CM)	-	-	17.600	62%	17.600	62%
	Días de trabajo perdidos (WDL)	-	-	3.518	12%	3.518	12%
	Bronquitis crónica (CB)	-	-	2.842	10%	2.842	10%
	Días de actividad restringida neta (netRAD)	-	-	2.295	8%	2.295	8%
	Días de actividad restringida menor (mRAD)	-	-	841	3%	841	3%
	Otros	-	-	1.456	5%	1.456	5%
	<b>Total</b>	-	-	28.552	100%	28.552	100%
SO <sub>2</sub>	Mortalidad aguda (MA)	3,6	4%	92	90%	96	94%
	Ingresos hospitalarios por causas respirat. - SO <sub>2</sub>	0,23	0,2%	5,9	6%	6,1	6%
	<b>Total</b>	3,9	4%	98	96%	102	100%
Nitratos	Mortalidad crónica (CM)	-	-	4.653	62%	4.653	62%
	Días de trabajo perdidos (WDL)	-	-	930	12%	930	12%
	Bronquitis crónica (CB)	-	-	752	10%	752	10%
	Días de actividad restringida menor (mRAD)	-	-	222	3%	222	3%
	Días de actividad restringida neta (netRAD)	-	-	607	8%	607	8%
	Otros	-	-	385	5%	385	5%
	<b>Total</b>	-	-	7.549	100%	7.549	100%
PM <sub>10</sub>	Mortalidad crónica (CM)	151	62%	3.037	62%	3.188	62%
	Días de trabajo perdidos (WDL)	30	12%	610	12%	640	12%
	Bronquitis crónica (CB)	24	10%	491	10%	515	10%
	Días de actividad restringida menor (mRAD)	7	3%	145	3%	152	3%
	Días de actividad restringida neta (netRAD)	20	8%	397	8%	417	8%
	Otros	12	5%	252	5%	264	5%
	<b>Total</b>	244	5%	4.932	95%	5.177	100%
<b>TOTAL</b>		248	1%	41.132	99%	41.380	100%

Nota: Otros incluye: Mortalidad infantil (IF), Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA), Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA), Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa), Uso de broncodilatadores adultos (BDUa), Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc), Uso de broncodilatadores niños (BDUc)

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2. Costes externos por contaminante

En términos del impacto global, se observa que los sulfatos son los compuestos que más daños generan sobre la salud humana, abarcando un 69% del mismo (véase Gráfico 5.5). Los nitratos son el segundo contaminante que más impacto genera, explicando un 18% sobre el total seguido de las partículas con un 12%. El daño generado por el SO<sub>2</sub> (efecto directo) puede ser considerado insignificante (0,3% sobre el total).

**Tabla 5.4** Resultado global y coste por kg de contaminante (US\$ 2009)

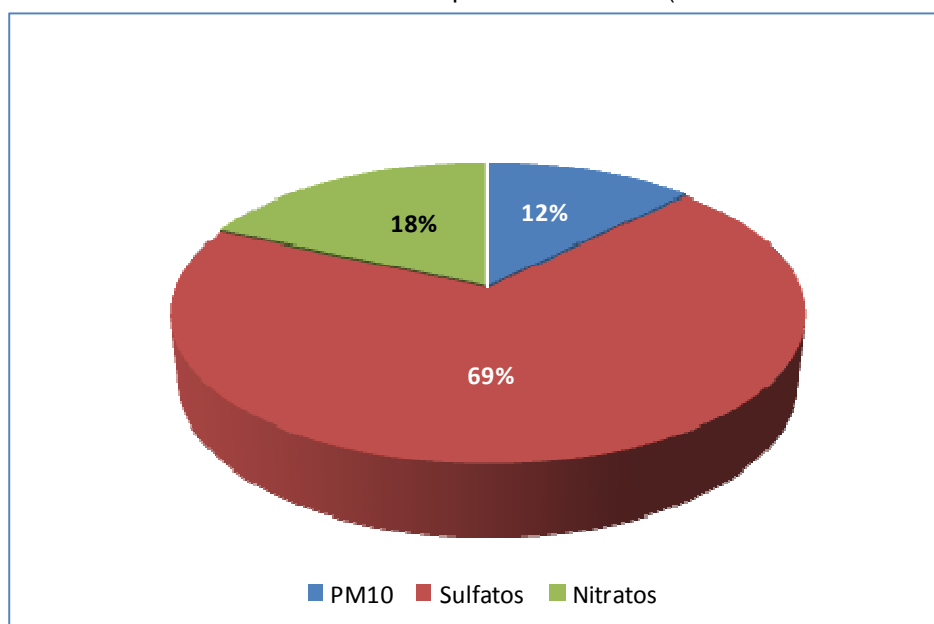
Contaminante	Emisiones (toneladas /año)	US\$/Kg (2009)	% Sobre el total del daño	Coste externo total (kUS\$, 2009)
PM <sub>10</sub>	5.226	1,0	12	5.175
SO <sub>2</sub> (efecto directo)	27.654	0,004	0,3	102
Nitratos (por kg de NO <sub>x</sub> )	3.058 <sup>(a)</sup>	2,5	18	7.550
Sulfatos (por kg de SO <sub>2</sub> )	27.654 <sup>(b)</sup>	1,03	69	28.552
<b>Total</b>				<b>41.378</b>

(a) Emisiones de NO<sub>x</sub>; (b) emisiones de SO<sub>2</sub>

Fuente: Elaboración propia

Pese a que los nitratos y sulfatos tienen la misma toxicidad ( $CRF_{\text{nitratos}} = CRF_{\text{sulfatos}}$ ) la elevada tasa de emisión de SO<sub>2</sub> hace que el impacto total sea elevado, tal y como refleja la Tabla 5.4. No obstante, la velocidad de remoción de los sulfatos es más elevada que la de los nitratos (véase Tabla 5.1), por lo que en términos proporcionales el impacto de los nitratos es más elevado.

En términos del tipo de contaminante, los compuestos secundarios (nitratos y sulfatos) generan un 87% del daño total, mientras que los primarios (PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub>) responden a un 13%. Como hemos manifestado anteriormente, esto ocurre por el hecho de que los impactos a escala local no son significativos.

**Gráfico 5.5** Distribución del coste externo por contaminante (% sobre coste externo total)

Fuente: Elaboración propia

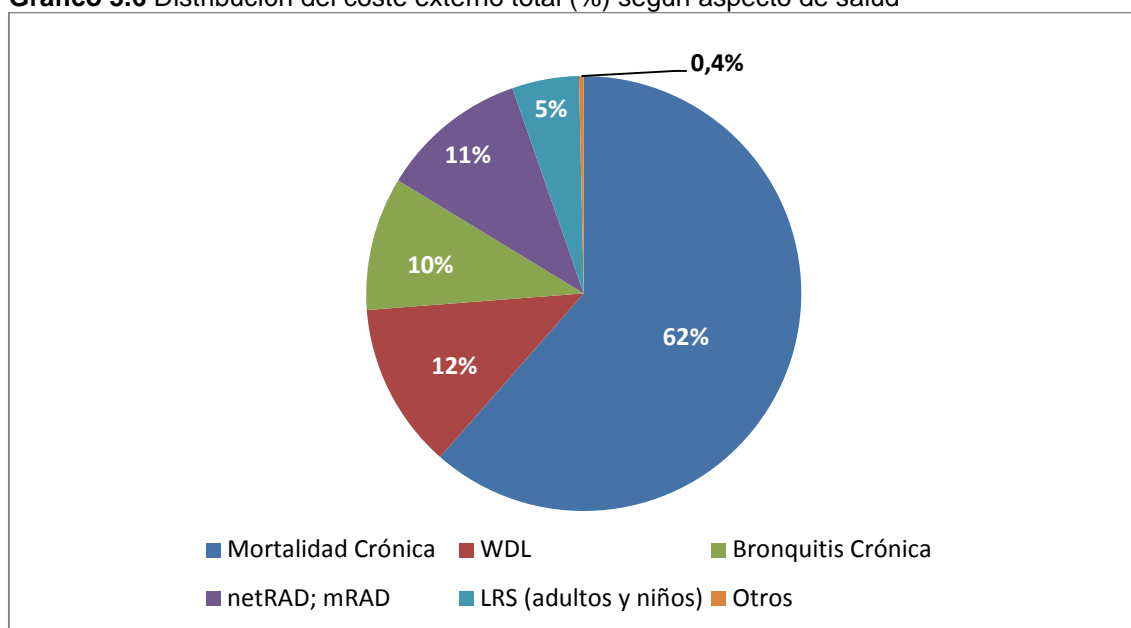
Es conveniente matizar que las externalidades asociadas con la generación de energía eléctrica variarán según las características técnicas de la central, las condiciones meteorológicas y la densidad poblacional.

### 5.2.3. Costes externos según aspecto de salud

Tras conocerse la composición del coste externo total, resulta interesante analizarlo según los aspectos de salud abordados en este estudio. Para ello, se procederá a un análisis en dos bloques conceptuales: mortalidad y morbilidad. Los aspectos relacionados con la mortalidad son: mortalidad crónica (YOLL), mortalidad infantil y mortalidad aguda. La morbilidad son los días de trabajo perdidos, días de actividad restringida, uso de broncodilatadores, ingresos hospitalarios, síntomas del tracto respiratorio inferior y bronquitis crónica.

En el Gráfico 5.6 se puede encontrar la distribución del coste externo total según el aspecto de salud. En los apartados que siguen, se analizará cada uno de estos aspectos con más detenimiento.

**Gráfico 5.6** Distribución del coste externo total (%) según aspecto de salud



Fuente: Elaboración propia

Nota:

WDL: Días de trabajo perdidos

netRAD: Días de actividad restringida neta / mRAD: Días de actividad restringida menor

LRS: Síntomas del tracto respiratorio inferior

Otros incluyen: Uso de broncodilatadores (BDU), ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA), ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA), mortalidad infantil (IF), mortalidad aguda.

### 5.2.3.1. Mortalidad

Dentro del cómputo total relacionado con las causas de mortalidad, se puede decir que el aspecto crónico (mortalidad crónica) abarca casi la totalidad del daño (99,6%). La mortalidad infantil y aguda juntas suponen menos de un 1% del impacto total (0,4%). Si se presta atención a la influencia de la mortalidad sobre el impacto total, se observa que este criterio abarca un 62% del mismo (véase Gráfico 5.6) Se trata en este sentido del aspecto de salud que más daño genera sobre la salud humana. La mortalidad aguda tiene un peso muy reducido sobre el impacto total: un 0,2%. Es relevante mencionar que solo la mortalidad crónica asociada con los sulfatos (contaminante secundario), abarca un 43% del coste externo. Y su homóloga vinculada con los nitratos responde a un 11% del coste externo total. En la Tabla 5.5, se expone la distribución de los aspectos relacionados con la mortalidad, divididos según el tipo de contaminante asociado.

**Tabla 5.5** Coste externo (US\$) – Mortalidad por contaminante

	<b>Coste total kUS\$ (2009)</b>	<b>Emisiones (toneladas/año)</b>	<b>Coste por kg (US\$ / kg)</b>	<b>% sobre coste total</b>
<b>PM<sub>10</sub></b>		5.226		
Mortalidad crónica	3.187	-	0,6	8%
Mortalidad infantil	0,7	-	0,0001	0,002%
<b>SO<sub>2</sub></b>		27.654		
Mortalidad aguda	96	-	0,003	0,2%
<b>Sulfatos</b>		27.654 (SO <sub>2</sub> )		
Mortalidad crónica	17.600	-	0,6(por kg de SO <sub>2</sub> )	43%
Mortalidad infantil	4,0	-	0,0001(por kg de SO <sub>2</sub> )	0,01%
<b>Nitratos</b>		3.058 (NO <sub>x</sub> )		
Mortalidad crónica	4.652	-	1,5(por kg de NO <sub>x</sub> )	11%
Mortalidad infantil	1,1	-	0,0003(por kg de NO <sub>x</sub> )	0,003%
<b>Total</b>	25.540	-	2,77	62%

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3.2. Morbilidad

La morbilidad explica un 38% del coste externo total. Tal y como se ha visto en el apartado relacionado con las funciones concentración-respuesta, los puntos de afección relacionados con la morbilidad son los siguientes:

- Bronquitis crónica (CB).
- Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA).

- Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA).
- Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRS) – Adultos y niños.
- Uso de broncodilatadores (BDU), adultos y niños asmáticos.
- Días de trabajo perdidos (WDL).
- Días de actividad restringida menor (mRAD) y días de actividad restringida neta (netRAD).

Los días de trabajo perdidos (WDL), los días de actividad restringida neta (netRAD), los días de actividad restringida menor (mRAD) y los nuevos casos de bronquitis crónica (CB) son los aspectos de morbilidad que más costes externos imponen. Juntos suponen un 33% del coste externo total. Tras analizar la participación de los distintos aspectos dentro del cómputo total de las causas de morbilidad (véase Gráfico 5.7), se observa que los cuatro aspectos más relevantes son los WDL (32%), los netRAD y mRAD (29%), CB (26%) y los síntomas del tracto respiratorio inferior<sup>150</sup> (13%). Juntos abarcan un 99% del daño relacionado con la morbilidad. Por otro lado, los ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares y respiratorias y el uso de los broncodilatadores suponen un 0,3% del coste externo por morbilidad. El Gráfico 5.7 expone la participación de los costes externos sobre el total del impacto relacionado con la morbilidad.

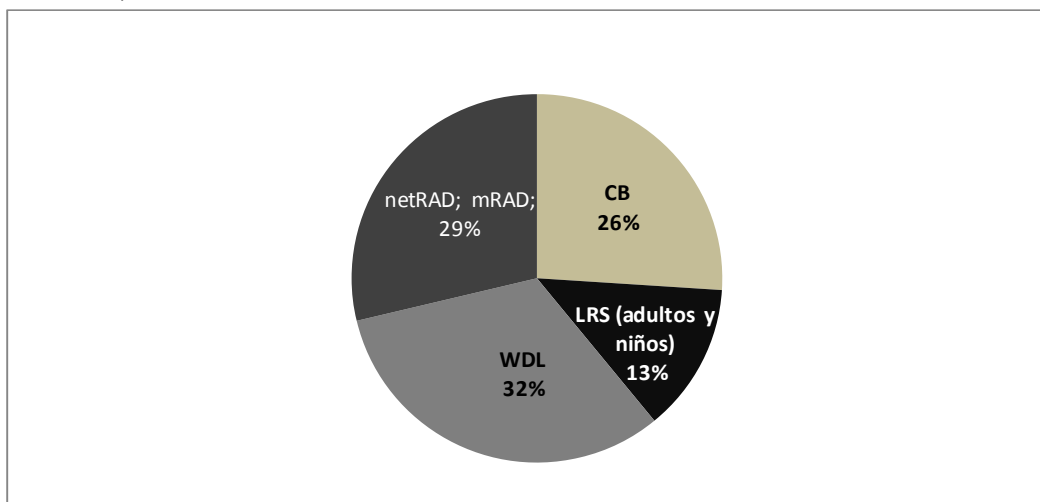
Con relación a la participación de los distintos aspectos de morbilidad sobre el coste externo total, se observa que la bronquitis crónica (CB) explica un 10% del coste externo total (Gráfico 5.6), siendo la mayoría asociada con los nitratos y sulfatos (un 9% sobre el coste externo total). Los WDL acaparan aproximadamente un 12% del coste externo total, que se distribuye entre un 9% asociado con los sulfatos, un 2% con los nitratos y un 1% con las PM<sub>10</sub>. Otro aspecto relevante relacionado con la morbilidad son los días de actividad restringida neta (netRAD) y menor (mRAD), que juntos abarcan un 11% del coste externo total (8% sulfatos, 2% nitratos y 1% PM<sub>10</sub>).

Los LRS (síntomas del tracto respiratorio inferior) explican un 13% de las causas de morbilidad y un 5% del daño total. Cabe resaltar que la mayor parte del daño asociado a los LRS se restringe a los adultos (4,7%) y una pequeña parte (0,3%) a los niños.

---

<sup>150</sup> LRSa (adultos) + LRSc (niños)

**Gráfico 5.7** Distribución del coste externo por morbilidad (% sobre el coste externo por morbilidad)



Fuente: Elaboración propia

Los demás aspectos relacionados con la morbilidad tienen una participación muy reducida sobre el daño total. Juntos, las admisiones hospitalarias cardiovasculares y respiratorias (RHA y CHA) y los broncodilatadores (BDU) abarcan un 0,1% del coste externo total. El uso de broncodilatadores en adultos y niños asmáticos impone costes que podrían ser considerados despreciables. En la Tabla 5.6 se presentan los costes externos totales y por kg de contaminante emitido, así como su participación (%) sobre el coste externo total.



**Tabla 5.6** Coste externo (US\$) – Morbilidad por contaminante

	<b>Coste total kUS\$ (2009)</b>	<b>Coste por kg (US\$ / kg)</b>	<b>% sobre coste total</b>
<b>PM<sub>10</sub></b>			
CB	515	0,1	1%
WDL	640	0,1	1%
mRAD	152	0,03	0,3%
netRAD	417	0,08	0,9%
RHA	3	0,0005	0,006%
CHA	2	0,0003	0,004%
LRSa	246	0,05	0,6%
BDUa	0	0,00007	0,001%
LRSc	13	0,002	0,03%
BDUc	0,3	0,00005	0,001%
<b>Total</b>	<b>1.988</b>	<b>0,4</b>	<b>4,8%</b>
<b>Sulfatos</b>			
CB	2.842	0,10	7%
WDL	3.518	0,1	8%
mRAD	841	0,03	2%
netRAD	2.295	0,08	5%
RHA	14	0,0005	0,03%
CHA	9	0,0003	0,02%
LRSa	1.355	0,05	3%
BDUa	2	0,00007	0,005%
LRSc	70	0,003	0,2%
BDUc	1,4	0,00005	0,003%
<b>Total</b>	<b>10.948</b>	<b>0,40</b>	<b>26%</b>
<b>Nitratos</b>			
CB	751	0,2	2%
WDL	930	0,3	2%
mRAD	222	0,1	0,5%
netRAD	607	0,2	1%
RHA	4	0,001	0,01%
CHA	2	0,001	0,01%
LRSa	358	0,1	1%
BDUa	1	0,0002	0,001%
LRSc	19	0,01	0,05%
BDUc	0,4	0,0001	0,001%
<b>Total</b>	<b>2.895</b>	<b>0,9</b>	<b>7%</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>			
RHA	6	0,0002	0,01%
<b>Total</b>	<b>15.837</b>	<b>1,7</b>	<b>38%</b>

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Cambio climático: emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Además de los impactos ocasionados sobre la salud humana, esta investigación también ha estimado los efectos del calentamiento global a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en particular del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se multiplica el consumo de carbón (toneladas de carbón/MWh) por la producción anual de electricidad (MWh). A

continuación, se multiplica el valor encontrado por el porcentaje de carbono fijo (27,2%) y por el cociente de masa del CO<sub>2</sub>/C (44CO<sub>2</sub>/12C)<sup>151</sup>. Por último, se multiplica por el porcentaje de carbón oxidado (99%) (IPCC, 2006). En la Tabla 5.7 , se ilustran los valores empleados para estimar dichas emisiones. Con relación al porcentaje de carbono fijo, hay que observar que dicho valor denota la baja calidad del carbón encontrado en suelo brasileño. Pires *et ál.* (2001) resalta que el carbón encontrado en el yacimiento de Candiota es de baja calidad con alto contenido en cenizas (carbón bituminoso alto volátil clase C). Para ofrecer una idea al respecto, el carbón encontrado en Estados Unidos tiene aproximadamente un 75% de carbono fijo. Además, el contenido en cenizas y metales pesados (Pires *et ál.* 2001) es muy superior a la media encontrada a nivel internacional.

**Tabla 5.7** Emisiones de CO<sub>2</sub> y su valoración económica.

Consumo de carbón (t/año) 2009	Producción energía eléctrica (MWh) <sup>(a), (b)</sup> 2009	t/MWh	Carbono fijo (%)	Cociente de masa 44CO <sub>2</sub> /12C	% carbono oxidado	ktCO <sub>2</sub> /año	UC (US\$/t CO <sub>2</sub> )	Coste externo total (kUS\$,2009)	US\$/MWh
1.215.334	900.410	1,35	27,22%	3,67	99%	1.201	52	62.444	69

Fuente: Elaboración propia

(a) Fuente: GCTEE (2009).

(b) Capacidad instalada de la central: 446MW.

Una vez estimadas las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> podemos valorar económicamente el coste externo en términos de cambio climático. Para ello, se ha considerado el coste unitario por tonelada de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera (Marten & Newbold, 2011). De esta forma, el coste externo total asociado con las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la central termoeléctrica de Candiota fue de 62 millones de dólares a precios del 2009 (véase Tabla 5.7 ).

#### 5.4. Resumen de los resultados

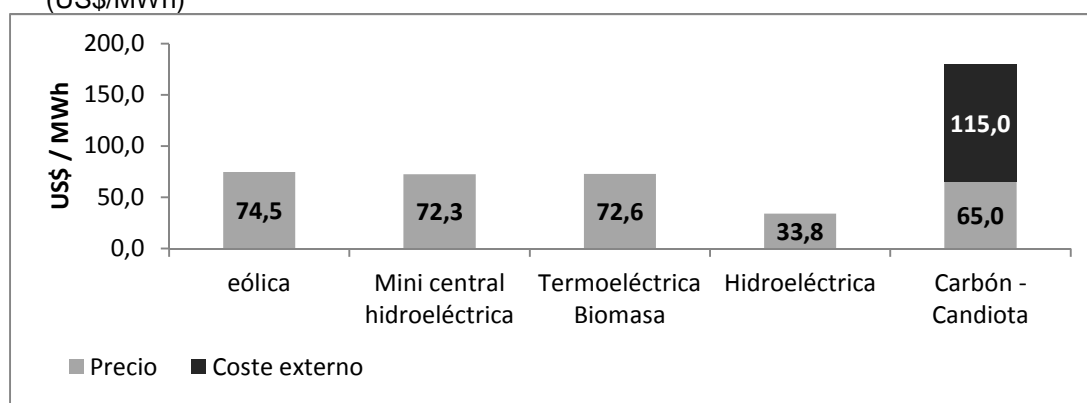
Tal y como se puede apreciar en la Tabla 5.2 y en el Gráfico 5.8 , el coste externo anual generado por la central termoeléctrica de Candiota fue de 103,8 millones de dólares (a precios del 2009). A modo ilustrativo, este valor representa un 11% de la inversión total destinada a la construcción de la Fase C del complejo de Candiota (US\$ 931,7 millones<sup>152</sup>), que entró en operación el 3 de enero de 2011. Para que se tenga

<sup>151</sup> Esta relación significa que durante el proceso de quema 12 gramos de carbono producen 44 gramos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (IPCC, 2006).

<sup>152</sup> El valor divulgado de la inversión destinada a la construcción de la Fase C fue de 1.500 mil millones de reales brasileños, unos 931 millones de dólares (2011). Fuente:

una idea al respecto, dicho coste externo es 1,6 veces el precio de la electricidad comercializada<sup>153</sup> (US\$ 65,00/MWh) por la central de Candiota en el mercado abierto de energía. Por otro lado, en el Gráfico 5.8 se presenta una comparativa entre el precio de la energía comercializada por la central de Candiota, el coste externo que genera y el precio comercializado por otras fuentes. Es interesante observar que, *grosso modo*, la internalización de los costes externos asociados con la termoeléctrica a carbón (Candiota) haría que su precio fuese más elevado que las otras fuentes. Conviene señalar que las demás fuentes de energía allí representadas también generan externalidades, aunque proporcionalmente inferiores a la generación a carbón. Hay que matizar que los valores presentados en el Gráfico 5.8 solo representan solamente los costes externos provenientes de la generación de electricidad. Además, los valores se fundamentan en promedios de capacidad instalada de las fuentes. Además, las características especiales de la central de Candiota (carbón de baja calidad, baja eficiencia térmica y elevadas tasas de emisión) hacen con que la diferencia sea alta. Si se trataran de plantas a carbón según la media internacional, haría que la diferencia fuese más reducida.

**Gráfico 5.8** Precio de la energía de distintas fuentes vs coste externo Candiota (2009). (US\$/MWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de: EPE (Empresa Brasileira de Pesquisa Energética). Resultados de las subastas de energía. Disponible en [www.epe.gov.br/leiloes](http://www.epe.gov.br/leiloes) (consulta realizada el 24 de febrero de 2012).

<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=103&periodico=62> (consulta realizada el 10 de agosto de 2011).

<sup>153</sup> En 2005 la Fase C (nueva unidad) de la termoeléctrica de Candiota comercializó su producción de energía en el mercado abierto (subasta) a un precio (reales brasileños) de R\$129,50/MWh (Fuente: CGTEE, 2009). En Dólares, US\$65,00 (US\$ 1,00 = R\$ 2,00; Tipo de cambio informado por el Banco Central do Brasil el 24 de febrero de 2012. Enlace: <http://www.bcb.gov.br/>).

## Parte II: Análisis de incertidumbre y sensibilidad

### 5.5. Análisis de incertidumbre

El objetivo de este apartado es llevar a cabo el análisis de la incertidumbre asociada con la estimación de los costes externos impuestos por la central de Candiota. Este tipo de análisis tiene gran relevancia habida cuenta de la considerable incertidumbre asociada con estudios de impacto ambiental, obligando de esta manera a enfocar los resultados desde diferentes ópticas. Además, permitirá una mejor comprensión de los impactos al contemplar distintas posibilidades de abordar los resultados desde una postura más conservadora y así compararla con la inversión necesaria para mitigar los daños.

Debido a las carencias en el trabajo científico, resulta particularmente difícil estudiar la incertidumbre relacionada con el impacto ambiental. El insuficiente conocimiento de aquellas variables, efectos o procesos asociados con los múltiples factores analizados hace que la valoración económica de las externalidades asociadas con la contaminación atmosférica presente niveles de incertidumbre nada despreciables. No cabe duda de que la incertidumbre de los estudios de impacto ambiental es más elevada que aquella usualmente reportada en estudios realizados en el ámbito de las ingenierías o la física.

Por otro lado, el desconocimiento de algunos aspectos relacionados con el impacto de determinados tipos de contaminantes sobre la salud humana hace que las funciones concentración-respuesta (CRF) reporten elevados grados de incertidumbre. La incertidumbre relacionada con el cambio climático suele abarcar cuatro escalas de magnitud, en cuanto que los aspectos vinculados con la morbilidad pueden llegar a retornar dos escalas a partir de la predicción central (Spadaro, 1999).

De esta forma, los estudios epidemiológicos tratan de estudiar la correlación entre la concentración de un determinado contaminante y el efecto sobre la salud humana. De ellos surgen las tasas de incremento de riesgo relativo que a su vez será un componente fundamental para la construcción de las CRF. Ya los modelos de dispersión procuran predecir el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Sin embargo, aquellas variables asociadas con futuros escenarios políticos y cuestiones éticas serán mucho más difíciles de eliminar o controlar en el análisis de

incertidumbre. Cuestiones como posibles curas para determinadas enfermedades como el cáncer, creación de cultivos agrícolas genéticamente resistentes o bien alcanzar un VSL (valor de una vida estadística) de consenso son factores que indudablemente serán más difíciles de abordar en términos de incertidumbre.

La mayoría de los estudios vinculados con la valoración del daño ambiental utilizan el método de simulación de Monte Carlo a la hora de ejecutar el análisis de incertidumbre. Spadaro & Rabl (2008) señalan que, pese a la rigurosidad y eficacia de este método, es muy complejo en datos y el resultado es una “caja negra” donde resulta difícil conocer la importancia de cada componente de incertidumbre y sobre todo valorar cómo cambiaría el resultado si un determinado componente cambia. Por otro lado, dichos autores han elaborado un método más sencillo y transparente (Spadaro & Rabl, 2008) basado en distribuciones log-normales. La justificación de este método se asienta en el hecho de que el cálculo de un determinado impacto (ej. bronquitis crónica) es esencialmente un producto de factores y, por ello, la incertidumbre resultante de un producto es aproximadamente log-normal.

Si recuperamos la ecuación general del UWM (véase Ecuación 5-1) podemos observar claramente como la misma asume una característica de función producto que abarca una serie de variables independientes<sup>154</sup>. Así, tal y como hemos mencionado, la incertidumbre resultante de tal proceso multiplicativo será log-normal.

$$D_{UWM} = \frac{\rho_{ef}}{k} \sum_i S_{CR,i} \cdot Q_p \cdot U_{coste,i}$$

*Ecuación 5-1*

En la ecuación general del UWM la  $\rho_{ef}$  es la densidad poblacional expresada en  $(\frac{pers.}{m^2})$ .  $S_{CR,i}$  es la pendiente de la función concentración-respuesta establecida para un determinado aspecto de salud cuya unidad viene dada por  $(\frac{casos/año}{pers. \cdot \frac{\mu g}{m^3}})$ .  $Q_p$  es la tasa de emisión del contaminante en  $(\frac{\mu g}{s})$ .  $U_{coste,i}$  es el coste unitario expresado en términos monetarios  $(\frac{\$}{caso})$ .  $k$  es la velocidad de remoción del contaminante analizado (*depletion velocity*) expresada en  $(\frac{m}{s})$ .

<sup>154</sup>A modo de ejemplo, la CRF y la concentración atmosférica son variables independientes entre ellas.

Para un simple impacto el proceso es multiplicativo pero cuando se tiene en cuenta más de un impacto, el daño total es finalmente la suma de muchos productos<sup>155</sup> (véase el sumatorio en la Ecuación 5-1). Es decir, la Ecuación 5-1 estima el daño para un tipo de impacto (ej. CRF para mortalidad crónica) y contaminante (ej. partículas). Al incorporar otra vía de impacto (ej. CRF para bronquitis crónica) asociada con otro contaminante (ej. sulfatos) el resultado en términos del impacto total es la suma de estos dos procesos multiplicativos individuales, tal y como se puede observar en la Ecuación 5-2.

$$Y = z_1 + z_2 \dots z_n$$

*Ecuación 5-2*

De esta forma, la media  $\mu_y$  de  $Y$  viene dada por:

$$\mu_y = \mu_{z1} + \mu_{z2} \dots \mu_{zn}$$

*Ecuación 5-3*

Donde  $\mu_{z1}$  es la media de  $Z_1$ . La desviación estándar  $\sigma_y$  de  $Y$  viene dada por (combinación cuadrática):

$$\sigma_y^2 = \sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2 \dots \sigma_{zn}^2$$

*Ecuación 5-4*

Por otro lado, esta relación no permite un análisis de  $\sigma_y$  en términos de un intervalo de confianza. Para ello, se necesita la distribución de probabilidad de  $Y$  que la mayoría de las veces es normal o lognormal (gaussiana)<sup>156</sup>.

Paralelamente, analizando cada impacto de una forma individualizada ( $Z_1 + Z_2 \dots Z_n$ ) el proceso resulta ser el producto de una serie de variables desvinculadas:

$$Z = x_1 x_2 \dots x_n$$

*Ecuación 5-5*

<sup>155</sup>Nótese que la ecuación general del UWM requiere parámetros individualizados para el tipo de impacto analizado. Es decir, se requiere la CRF para bronquitis crónica asociada con un determinado contaminante, la tasa de emisión y DV de este último, la densidad poblacional y el coste unitario vinculado con este impacto (coste de un nuevo caso de bronquitis).

<sup>156</sup>Cuando la distribución es gaussiana el 68% de intervalo de confianza viene dado por  $[\mu_y - \sigma_y, \mu_y + \sigma_y]$  y  $[\mu_y - 2\sigma_y, \mu_y + 2\sigma_y]$  para un intervalo de confianza del 95%.

Donde  $x_1$  es cada variable del UWM como, por ejemplo, la velocidad de remoción, la pendiente de la función concentración-respuesta, etc. (véase Ecuación 5-1). Teniendo en cuenta que se trata de una distribución log-normal y dada la independencia de las variables, la desviación geométrica estándar ( $\sigma_g$ ) del producto  $z$  viene dada por la siguiente fórmula:

$$[\ln(\sigma_g)]^2 = [\ln(\sigma_{g1})]^2 + [\ln(\sigma_{g2})]^2 + \dots + [\ln(\sigma_{gn})]^2$$

*Ecuación 5-6*

Para combinar todas las fuentes de incertidumbre, basta con identificar las distintas  $\sigma_g$  asociadas a cada una de las variables independientes, obtener el logaritmo natural de cada una de ellas y elevar el valor al cuadrado.

En lo que se refiere a la media geométrica ( $\mu_g$ ), su valor viene dado por la siguiente expresión:

$$\mu = \mu_g \exp\left(\frac{[\ln(\sigma_g)]^2}{2}\right)$$

*Ecuación 5-7*

Tal como se ha señalado anteriormente, la ecuación general del UWM es un proceso multiplicativo que abarca cuatro variables independientes aleatorias: (a) el incremento de la concentración; (b) funciones concentración-respuesta; (c) la densidad poblacional y (d) los costes unitarios. Según los fundamentos planteados en el teorema del límite central, en el límite, la suma de diferentes variables independientes hace con que la función de distribución se aproxime a una distribución normal. La distribución log-normal es la distribución natural cuando se trata de procesos multiplicativos, definida por la media geométrica  $\mu_g$  y la desviación geométrica estándar  $\sigma_g$ . De esta manera, la probabilidad es de aproximadamente un 68% para que el valor correcto se encuentre en el intervalo  $\left[\frac{\mu_g}{\sigma_g}, \mu_g \times \sigma_g\right]$ ; IC 68% y de un 95% para que se encuentre en el intervalo  $\left[\frac{\mu_g}{\sigma_g^2}, \mu_g \times \sigma_g^2\right]$ ; IC 95%.

Spadaro & Rabl (2008) señalan que los valores típicos de desviación geométrica ( $\sigma_g$ ) estándar suelen variar entre 3 y 5 dependiendo del tipo de contaminante. Estos autores mencionan que para los contaminantes primarios y secundarios ( $PM_{10}$ ,  $SO_2$  y  $NO_x$ ), la  $\sigma_g$  recomendada sería entre 3 y 4. Para los gases

de efecto invernadero (GEI) se recomienda una  $\sigma_g$  entre 4 y 5. Dichos valores son obtenidos tras combinar las distintas fuentes de incertidumbre (Spadaro & Rabl, 2008).

En los apartados que siguen se analizarán con más detalle cada una de las fuentes de incertidumbre con el objetivo de determinar la  $\sigma_g$  asociada con cada tipo de contaminante.

#### 5.5.1. *Modelos de dispersión atmosférica: cálculo de la exposición*

Esta variable tiene asociada la incertidumbre proveniente de los modelos de dispersión atmosférica y transformación química entre contaminantes. Dichos modelos son más eficaces al predecir valores medios, más que eventos aislados. Básicamente, gran parte de la incertidumbre sobre los modelos de dispersión está asociada con la velocidad de remoción de un determinado contaminante, que a su vez dependerá de los mecanismos de transformación química y deposición seca y húmeda. Por este motivo, dichos modelos son más eficaces a la hora de predecir concentraciones de especies no reactivas (ej. partículas;  $PM_{10}$ ). Los modelos que incluyen reacciones de especies secundarias son, obviamente, menos precisos. Spadaro & Rabl (2008) señalan que los valores típicos de la desviación geométrica estándar ( $\sigma_g$ ) se sitúan entre dos y cinco, pero en general no hacen distinción entre eventos episódicos o valores promedio. Spadaro (1999), basándose en una muestra a escala logarítmica expuesta en Sehmel (1980), apuntó que la  $\sigma_g$  para el  $SO_2$  sería de aproximadamente 2,5. Para las partículas, Spadaro (1999) basándose en los estudios elaborados por Nicholson (1988) y Seinfeld & Pandis (1998), sugiere una distribución log-normal cuya variación en las mediciones de las velocidades de remoción dependerá del tipo de superficie y de las condiciones encontradas durante la observación.

Uno de los parámetros clave del UWM en términos de modelos de dispersión atmosférica es la velocidad de remoción (DV). La DV es una variable de gran influencia sobre el resultado cuando se trate de fuentes ubicadas en zonas rurales como es el caso de la central de Candiota, pero en zonas urbanas dicha diferencia es más reducida. Tal y como se ha dicho en el capítulo anterior, valores bajos de la DV en condiciones climáticas secas pueden causar impactos elevados. Por otro lado, bajo condiciones climáticas húmedas, la dispersión de largo alcance de los contaminantes se verá limitada por la deposición húmeda.



Los valores de las  $\sigma_g$  de cada parámetro asociado con los modelos de dispersión están expuestos en la Tabla 5.9 . Dichos valores han sido recomendados en el trabajo de Spadaro & Rabl (2008) y tras combinarlos utilizando la Ecuación 5-6 se encuentran las desviaciones geométricas estándar asociadas con esta fuente de incertidumbre (modelos de dispersión):

$\sigma_g = 1,5$  para las PM

$\sigma_g = 1,76$  para los sulfatos

$\sigma_g = 1,90$  para los nitratos

#### 5.5.2. Funciones concentración-respuesta (CRF)

Las CRF son, en cualquier caso, la parte más vulnerable en términos de incertidumbre, y sus intervalos de confianza suelen ser más elevados que aquellos usualmente reportados. Al tratar la incertidumbre relacionada con las CRF, el investigador se encontrará con tres fuentes básicas. En primer lugar, la incertidumbre puede venir dada por las suposiciones vinculadas con la correlación entre un contaminante y el supuesto impacto sobre la salud que genera. En un segundo plano, pueden existir incertidumbres acerca del formato de la función, es decir, si su característica es con o sin umbral. Un tercer aspecto y tan importante como los anteriores, es la manera de trasladar la función de una zona geográfica a otra. Spadaro (1999) apunta que las distribuciones de probabilidad asociadas con las CRF normales y para estimar la correspondiente desviación geométrica estándar ( $\sigma_g$ ) hay que tener en cuenta los valores específicos de cada aspecto de salud.

Además, tal y como se ha mencionado al principio de este apartado, hay otras fuentes de incertidumbre asociadas con las CRF que básicamente tienen que ver con el lugar donde han sido realizados los estudios epidemiológicos y la eventual transferibilidad de dichas funciones hacia otras realidades. En esta línea, pueden existir diferencias biológicas entre la población analizada en un determinado estudio y aquellas por las cuales se desee transferir la CRF. Por otro lado, la determinación de las CRF tiene que ver con la composición de los contaminantes en el aire, la toxicidad de la mezcla de contaminantes y las enfermedades previas existentes entre la población afectada. En este sentido, como se ha señalado en el capítulo anterior, dicha distribución puede variar. A modo de ejemplo, dependiendo del tipo de instrumento de control de emisiones, el reparto entre partículas finas ( $PM_{2,5}$ ) y coarse

(PM<sub>10-2,5</sub>) en el aire puede variar considerablemente. Se ha visto en el capítulo anterior como la ratio entre las partículas finas/coarse es diferente entre Estados Unidos, China y Europa.

Spadaro & Rabl (2008) recomiendan los siguientes valores de  $\sigma_g$  para los principales parámetros asociados con la incertidumbre proveniente de las CRF:

- $\sigma_g = 1,5$ : riesgo de mortalidad (IRR): PM, sulfatos y nitratos;
- $\sigma_g = 1,5$ : toxicidad de las partículas primarias;
- $\sigma_g = 2,0$ : toxicidad de los nitratos y sulfatos;
- $\sigma_g=1,6$ : cálculo de los YOLL para un determinado riesgo de mortalidad<sup>157</sup>.

De esta forma, tras computar dichas fuentes de incertidumbre vinculadas con las CRF (véase Tabla 5.9 ), se estimaron las siguientes  $\sigma_g$ : 2,10 (PM), 2,54 (sulfatos) y 2,54 (nitratos).

#### 5.5.3. Costes unitarios (UC)

Algunas externalidades sobre la salud humana pueden ser fácilmente valoradas a través de precios de mercado. Es el caso, por ejemplo, del coste de una internación hospitalaria o del uso de broncodilatadores. No obstante, determinados impactos no pueden ser valorados simplemente por precios de mercado y requieren el uso de algunas herramientas de análisis económico como la valoración contingente. La incertidumbre asociada con los UC surge básicamente por dos vías: (a) por su composición futura (problemas intergeneracionales) y (b) por los problemas relacionados con la recolección de datos<sup>158</sup> a la hora de realizar estudios, por ejemplo, de valoración contingente. Este último aspecto recae, por ejemplo, en las cuestiones asociadas con la valoración de la pérdida de expectativa de vida o los años de vida perdidos (YOLL). La determinación del mismo viene dada a partir del valor de una vida estadística (VSL), obtenida a partir de estudios de valoración contingente. Tal y como se mencionó anteriormente, el corolario del VSL es determinar la disposición a pagar

---

<sup>157</sup> Nota del director (10 de mayo de 2012): El valor original en el trabajo de Spadaro&Rabl (2008) fue de  $\sigma_g = 1,3$ . No obstante, a sugerencia del Dr. Joseph Vito Spadaro, se otorgó una desviación geométrica estándar algo más alta (1,6) con relación al valor mencionado en el estudio, puesto que la metodología de la CRF (YOLL) aplicada en este caso de estudio podría redundar en una incertidumbre ligeramente más elevada con relación a la tradicional CRF (YOLL) mencionada en el estudio.

<sup>158</sup> Aunque aumente la cantidad de datos disponibles la incertidumbre no reduce tanto puesto que las personas son diferentes en términos, por ejemplo, de salud.

(DAP) de un determinado individuo para reducir el riesgo de muerte o de padecer una determinada enfermedad.

A partir de los años 70 del siglo pasado una serie de estudios han ido proponiendo distintos VSL. Como se puede comprobar en la Tabla 5.8, la diferencia entre ellos representaba una gran variación. No obstante, actualmente existe un relativo consenso en aplicar valores de entre 1 y 5 millones de euros. De hecho, el departamento de transportes estadounidense aplica un valor de tres millones de dólares y la USEPA<sup>159</sup> de seis millones. En la Unión Europea se suelen aplicar valores de entre uno y cinco millones de dólares (Spadaro & Rabl, 2008). Hay que matizar que las diferencias entre los estudios mencionados en la Tabla 5.8 derivan de una serie de factores como el local donde se han realizado, metodología entre otros.

**Tabla 5.8** Algunos estudios precursores de VSL estimados entre diversos países

Estudios	País	VSL **
Arnould-Nichols (1983)	EUA	US\$ (1989) 870.000
Dillinharn (1979)	EUA	US\$ (1989) 550.000
Olson (1981)	EUA	US\$ (1989) 9.680.000
Smith, R. (1974)	EUA	US\$ (1989) 10.220.000
Smith, R. (1975)	EUA	US\$ (1989) 4.500.000
Thaler Rosen (1976)	EUA	US\$ (1989) 780.000
Viscusi (1978)	EUA	US\$ (1989) 3.950.000 - 5.320.000
Viscusi (1981)	EUA	US\$ (1989) 9.540.000 - 14.990.000
Marin-Psacharopoulos (1982)	Reino Unido	US\$ (1989) 4.090.000
Veijanovski (1980)	Reino Unido	US\$ (1989) 8.450.000 - 11.440.000
Needlernan (1979)	Reino Unido	US\$ (1989) 320.000 - 1.790.000
ExternE (European Comission, 2004)	Unión Europea	€ (2004) 1.000.000 (MEDIAN)
CAFE (AEAT, 2005)	Unión Europea	€ (2005) 980.000 (MEDIAN) – 2.000.000 (MEAN)

\*\* Los valores, excepto ExternE y CAFE, han sido actualizados a fecha de 1989 por Sala (1999).

Fuente: Elaboración propia a partir de Sala (1999), ExternE (European Comission, 2005) y CAFE (AEAT, 2005).

De esta manera, Spadaro & Rabl (2008) recomiendan una  $\sigma_g$  de 2,0 para el valor de un año de vida perdido (VOLY), aplicable para las PM y compuestos

<sup>159</sup>United States Environmental Protection Agency

secundarios. En la Tabla 5.9 se resumen las desviaciones geométricas estándar asociadas con cada una de las fuentes de incertidumbre descritas anteriormente. De esta forma, tal y como hemos mencionado al principio de este bloque, la desviación geométrica estándar del producto  $z$  se define a partir de la Ecuación 5-6 donde se introducen las  $\sigma_g$  asociadas con cada fuente de incertidumbre. Los valores estimados para este caso de estudio son (Tabla 5.9 ):

- PM:  $\sigma_g = 3,0$
- Sulfatos:  $\sigma_g = 3,5$
- Nitratos:  $\sigma_g = 4,0$

Los mismos serán utilizados para ejecutar el análisis de incertidumbre que será presentado en el siguiente apartado.

**Tabla 5.9** Resumen de las  $\sigma_g$  según fuente de incertidumbre.

Fuente de incertidumbre	$\sigma_g$ PM	$[\ln(\sigma_g)]^2$	$\sigma_g$ SO <sub>2</sub> (vía sulfatos)	$[\ln(\sigma_g)]^2$	$\sigma_g$ NO <sub>x</sub> (vía nitratos)	$[\ln(\sigma_g)]^2$
<b>Modelos de dispersión</b>						
<i>Dispersión</i>	1,5	0,16	1,7	0,3	1,7	0,3
<i>Transformación química</i>	1,0	0,00	1,2	0,03	1,4	0,1
<i>Background emissions</i>	1,0	0,00	1,1	0,002	1,2	0,02
<b>Total <math>\sigma_g</math> modelos de dispersión</b>	<b>1,50</b>	0,16	<b>1,8</b>	0,3	<b>1,90</b>	0,4
<b>CRF</b>						
<i>Toxicidad PM</i>	1,5	0,2	2	0,5	2	0,5
<i>RR<sup>(a)</sup></i>	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
<i>YOLL<sup>(b)</sup></i>	1,6	0,2	1,6	0,2	1,6	0,2
<b>Total <math>\sigma_g</math> para CRF</b>	<b>2,1</b>	0,6	<b>2,5</b>	0,9	<b>2,5</b>	0,9
<b>Costes Unitarios (UC)</b>						
<i>VOLY<sup>(d)</sup></i>	2,0	0,5	2,0	0,5	2,0	0,5
<b>Total <math>\sigma_g</math> para UC</b>	<b>2,0</b>	0,5	<b>2,0</b>	0,5	<b>2,0</b>	0,5
<b>Total ecuación 5-6</b>	<b>≈ 3,0</b>	1,2	<b>≈ 3,5</b>	1,7	<b>≈ 4,0</b>	1,8

(a) Riesgo Relativo; (b) Cálculo de los años de vida perdidos (YOLL); (c) VOLY=Valor de un YOLL  
Fuente: Elaboración propia a partir de Spadaro&Rabl (2008)

Conviene matizar que los valores de la  $\sigma_g$  para los nitratos han sido redondeados hacia arriba, mientras que los sulfatos a la baja. Esto se justifica por la incertidumbre relacionada con los efectos de los primeros.

#### 5.5.4. Combinación de las incertidumbres

Tras combinar las diferentes fuentes de incertidumbre y obtener las desviaciones geométricas estándar para cada contaminante, se ha podido calcular la incertidumbre general asociada con el caso de estudio.

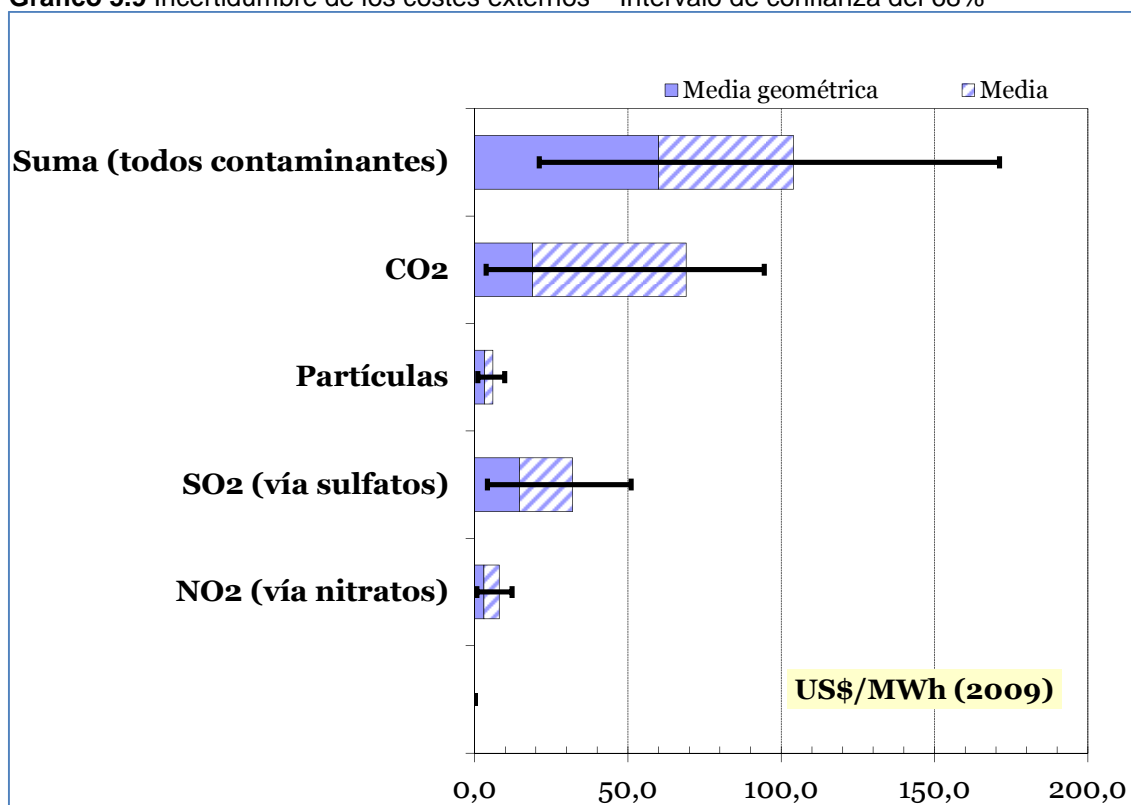
Como se ha podido comprobar en el apartado anterior, el coste del daño asociado con los contaminantes atmosféricos involucra una suma de productos. Pese a que resulta relativamente fácil combinar las distintas desviaciones estándar geométricas ( $\sigma_g$ ) asociadas con cada tipo de impacto (ej. mortalidad crónica), la suma de todos los impactos requiere determinar la desviación estándar de cada producto (desviación estándar  $\sigma$  de la suma). A partir de la desviación estándar de la suma de los productos, se permite calcular la correspondiente desviación geométrica estándar según los parámetros establecidos en Spadaro & Rabl (2008). Estos autores resaltan que, a pesar de que dicho procedimiento no es muy riguroso<sup>160</sup>, en la práctica los cálculos pueden ser simplificados si se tiene en cuenta que en la combinación cuadrática los pequeños errores son despreciables.

De esta manera, a partir de las  $\sigma_g$  mencionadas en el apartado anterior, se aplicó la herramienta *uncertainty calculator*, versión 1.0<sup>161</sup> elaborada por Spadaro & Rabl (2008) para determinar la incertidumbre asociada con cada contaminante atmosférico, así como la incertidumbre asociada con la suma de todos ellos. En el Gráfico 5.9 se puede observar el comportamiento de la incertidumbre para un intervalo de confianza del 68%, asociada con el caso de estudio de la central de Candiota. Además, en la Tabla 5.10 se pueden encontrar para cada uno de los contaminantes los valores de la desviación geométrica estándar, la media geométrica, los coeficientes de variabilidad, la desviación estándar y los costes externos estimados en el caso de estudio que se han tenido en cuenta para calcular la incertidumbre. Los valores del intervalo de confianza (IC 68%), así como los demás datos presentados en la Tabla 5.10, han sido obtenidos tras introducir los valores de las desviaciones geométricas estándar ( $\sigma_g$ ) calculadas en el apartado anterior y los costes marginales (US\$/MWh) de cada contaminante (partículas, sulfatos y nitratos) en la herramienta *uncertainty calculator*. El coste externo asociado con las emisiones de CO<sub>2</sub> ha sido estimado en el apartado 5.3 y la  $\sigma_g$  (5,0) atiende a la recomendación de Spadaro & Rabl (2008).

<sup>160</sup> Las ecuaciones son exactas para distribuciones log-normales y por ello la solución analítica es mucho más complicada y solo es aproximada.

<sup>161</sup> *Uncertainty Calculator* (versión 1.0). Herramienta elaborada por el Dr. Joseph V. Spadaro & Ari Rabl a partir de los postulados mencionados en Spadaro & Rabl (2008).

**Gráfico 5.9** Incertidumbre de los costes externos – Intervalo de confianza del 68%



Fuente: *Uncertainty Calculator* (versión 1.0). Spadaro & Rabl (2008).

**Tabla 5.10** Análisis de incertidumbre del coste del daño por contaminante (caso de estudio)

Contaminante	Datos insertados en el <i>Uncertainty calculator</i> (input)		Cálculos realizados por el <i>Uncertainty calculator</i> (output)			
	Coste externo (US\$/ MWh) <sup>(a)</sup> $\mu$	Desviación estándar geométrica, $\sigma_g$	Desviación estándar, $\sigma$	Coefficiente variabilidad, $\sigma/\mu$	Media geométrica, $\mu_g$	Intervalo de confianza 68%
CO <sub>2</sub>	69	5,0	242,3	3,5	18,9	3,8 94,5
PM <sub>10</sub>	6	3,0	9,2	1,5	3,3	1,1 9,8
SO <sub>2</sub> (vía sulfatos)	32	3,5	62,4	1,9	14,6	4,2 51,1
NO <sub>2</sub> (vía nitratos)	8	4,0	19,3	2,4	3,1	0,8 12,2
<b>SUMA (todos los contaminantes)</b>	<b>103,9</b>	<b>2,8</b>	<b>146,8</b>	<b>1,4</b>	<b>60,0</b>	<b>21,1 171,2</b>

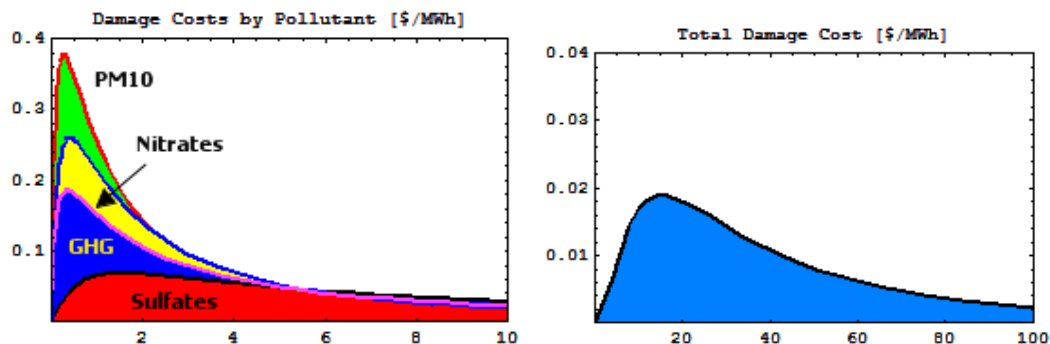
(a) Los costes por MWh son aquellos estimados al principio de este capítulo y están representados en la tabla 5.2.

Fuente: *Uncertainty Calculator* (versión 1.0). Spadaro & Rabl (2008).

El análisis de incertidumbre será de fundamental importancia a la hora de comparar las distintas alternativas tecnológicas que podrían llevarse a cabo para mitigar el daño. Resulta ser una pieza fundamental a la hora de promover una comparación con el coste privado de una determinada tecnología, puesto que dada la

incertidumbre de los costes externos podremos compararlo bajo distintas perspectivas. Bajo un punto de vista práctico, a partir de los valores mínimo y máximo (*upper bound/lower bound*), sería posible comparar el coste externo bajo una perspectiva conservadora (límite inferior) con el coste privado necesario para reducir el impacto. Por otro lado, el resume la información contenida en la Tabla 5.10 permitiéndonos visualizar las distribuciones log-normales asociadas con cada uno de los contaminantes así como la suma de estas distribuciones.

**Gráfico 5.10** Distribuciones lognormales por contaminante y sumatorio de estas distribuciones



Nota: GHG. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Fuente: Elaboración propia a partir del software "Mathematica v8"

## 5.6. Análisis de sensibilidad

Tal y como se ha dicho al principio de este capítulo, el análisis de sensibilidad tiene por objetivo evaluar aquellos aspectos relacionados con la metodología del UWM que más influencia podrían tener sobre los resultados. Además, algunos criterios analizados servirán de base a la hora de plantear el análisis de las alternativas tecnológicas dirigidas a mitigar el daño. Como se verá más adelante, se plantearán distintos escenarios como, por ejemplo, considerar "nula" la toxicidad de los nitratos y observar cómo se comportan los resultados. A partir de estos escenarios, podemos comparar el coste externo con los costes privados (inversión) desde distintas ópticas como, por ejemplo, desde un enfoque conservador (ej. solo considerando los efectos de las partículas).

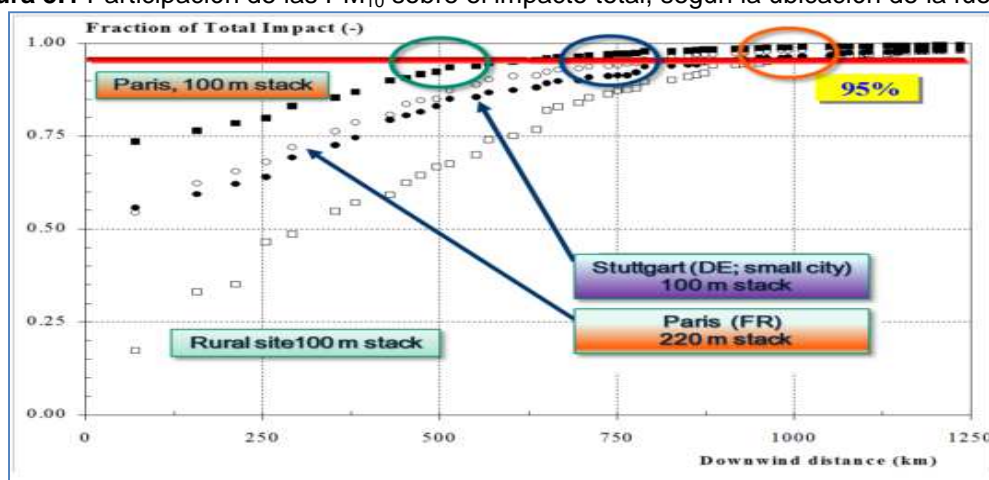
Analicemos cada uno de estos aspectos con más detalle.

### 5.6.1. Datos meteorológicos y ubicación de la central (*siting*)

La ubicación de la central, situada en una zona rural poco poblada, hace que los efectos a escala local (radio inferior a 50km a partir de la fuente) sean muy

reducidos con respecto a los efectos estimados a nivel regional (radio inferior a 1.000km a partir de la fuente). De esta manera, como se ha podido observar en el capítulo anterior, los efectos a escala local responden a solo el 1% del impacto total (99% a escala regional). Estas evidencias van en consonancia con las estimaciones realizadas por Spadaro (2011), donde señala que, en el caso de una fuente ubicada en una zona rural, los efectos de las partículas podrían representar entre un 5% y un 20% del impacto total. Este autor ha realizado una serie de estimaciones para diversas ciudades europeas y su constatación fundamental ha sido que, dependiendo de la ubicación de la central, la participación de las partículas sobre el daño total cambia drásticamente. Lo mismo ocurre con los nitratos y sulfatos, cuyos efectos aumentan a medida que se van distanciando de la fuente generadora. En las figuras que aparecen a continuación, extraídas de Spadaro (2011), podemos observar este hecho de una forma más gráfica. La Figura 5.1 representa la participación de las partículas sobre el impacto total, según la ubicación de la fuente y altura de la chimenea. La Figura 5.2 representa la participación de los nitratos y sulfatos sobre el impacto total a medida que se van distanciando de la fuente generadora. A partir del análisis de las figuras de abajo, podemos observar cómo la participación de las partículas aumenta cuando la fuente está ubicada cerca de un gran centro poblacional (ej. París). En contrapartida, cuando dicha central está localizada en una zona rural la participación se reduce considerablemente (menos de un 20%). Por otro lado, los nitratos y sulfatos (véase Figura 5.2) van aumentando su participación sobre el impacto total a medida que crece la distancia desde la fuente generadora. Cabe recordar que en el caso de estudio de Candiota las partículas representan un 13% del impacto total y los compuestos secundarios un 87%.

**Figura 5.1** Participación de las PM<sub>10</sub> sobre el impacto total, según la ubicación de la fuente<sup>162</sup>

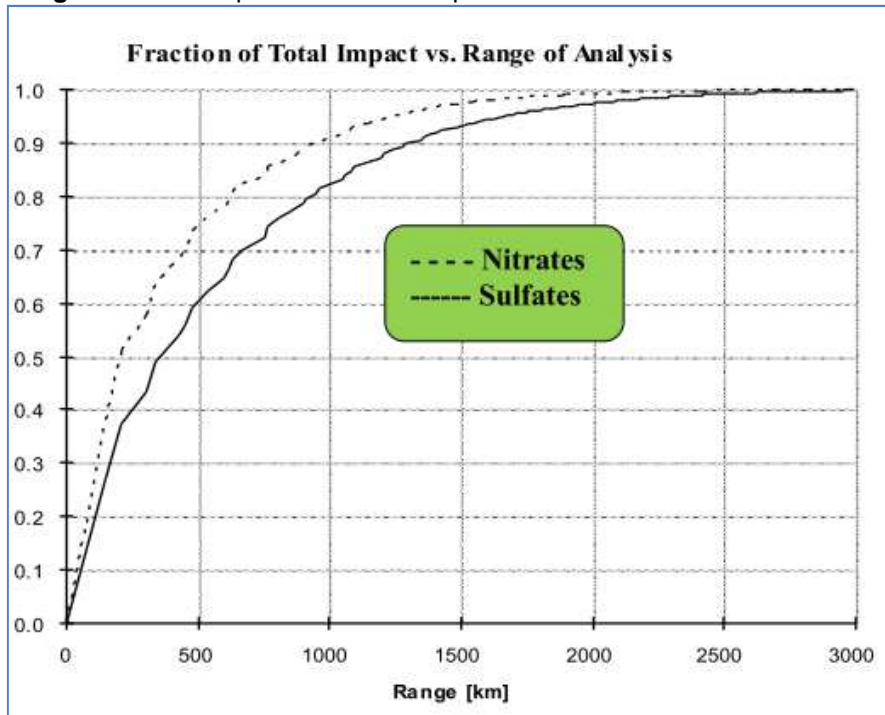


Fuente: Spadaro (2011)

<sup>162</sup>Estimaciones realizadas para dos ciudades europeas: París y Stuttgart



**Figura 5.2** Participación sobre el impacto total vs. distancia de la fuente



Fuente: Spadaro (2011)

Lo expuesto arriba conlleva una importante conclusión con respecto a la importancia de los datos meteorológicos en situaciones donde una central esté localizada en una zona rural. Como se ha mencionado en el capítulo cuatro, los modelos de dispersión gaussianos como el ISC<sup>163</sup> (utilizados en el UWM) predicen las concentraciones a escala local y por ello cuando se trata de una central ubicada en una zona rural el impacto sería pequeño, no habiendo por lo tanto necesidad de una valoración detallada. Para comprobar este hecho, si simulamos el coste externo a partir de la ecuación simplificada (SUWM) del modelo (véase Ecuación 5-1)<sup>164</sup> encontramos que el coste externo para las PM<sub>10</sub> es solo un 8% más elevado con relación a la versión robusta utilizada en el caso de estudio y que contó con datos meteorológicos. Con relación a los sulfatos y nitratos, la diferencia entre el SUWM y el RUMW es de solo un 3%. En la Tabla 5.11, se resumen los impactos a partir de ambas versiones del modelo. Los postulados expuestos señalan que los efectos de los contaminantes y, por ende, la composición y monto del coste externo total son muy sensibles a la ubicación de la central (urbana o rural).

<sup>163</sup> Industrial Source Complex

<sup>164</sup> Estimación teniendo en cuenta el coste unitario para la mortalidad crónica (US\$26.815,00), una tasa de emisión de 1 tonelada por año, densidad poblacional de 36 personas por km<sup>2</sup>, pendiente de la CRF 3,76 x 10<sup>-4</sup> y velocidad de remoción de 1,57 cm/s (PM<sub>10</sub>).

**Tabla 5.11** Costes externos SUWM vs. RUWM (millones de US\$;2009)

Aspecto de salud	PM <sub>10</sub>			Sulfatos			Nitratos			SO <sub>2</sub>		
	Caso estudio	SUWM	Δ % SUWM/ RUWM	Caso estudio	SUWM	Δ % SUWM/ RUWM	Caso estudio	SUWM	Δ % SUWM/ RUWM	Caso estudio	SUWM	Δ % SUWM/ RUWM
<b>Mortalidad</b>	-									-	-	
Mortalidad crónica (CM)	3.186.707	3.186.707	10%	17.600.118	18.436.821	5%	4.652.321	4.874.545	5%	-	-	-
Mortalidad infantil (IF)	682	749	10%	3.961	3.937	-1%	1.047	1.041	-1%	-	-	-
Mortalidad aguda (MA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95.961	95.705	-0,3%
<b>Morbilidad</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bronquitis crónica (CB)	515.353	545.963	6%	2.842.019	2.869.505	1%	751.390	758.674	1%	-	-	-
Días de trabajo perdidos (WDL)	640.441	661.550	3%	3.518.024	3.477.015	-1%	930.064	940.305	1%	-	-	-
Días de actividad restringida menor (mRAD)	152.286	161.270	6%	841.006	847.612	1%	222.368	224.102	1%	-	-	-
Días de actividad restringida neta (netRAD)	416.762	456.368	10%	2.295.015	2.398.607	5%	606.811	634.172	5%	-	-	-
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	2.618	2.879	10%	14.380	15.130	5%	3.801	4.000	5%	-	-	-
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	1.616	1.775	10%	8.896	9.331	5%	2.352	2.467	5%	-	-	-
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	245.777	260.458	6%	1.355.009	1.368.933	1%	358.348	361.935	1%	-	-	-
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	348	388	11%	1.914	2.037	6%	506	539	6%	-	-	-
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	12.809	13.710	7%	70.470	72.060	2%	18.627	19.052	2%	-	-	-
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	256	289	13%	1.415	1.521	7%	374	402	8%	-	-	-
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO <sub>2</sub>	-			-	-	-	.			6.089	6.406	-0,3%
<b>Total</b>	5.175.654	5.613.263	<b>8%</b>	28.552.228	27.781.548	<b>3%</b>	7.548.009	7.804.177	<b>3%</b>	102.050	102.111	<b>0,1%</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 5.6.2. *Funciones concentración-respuesta: Número de muertes prematuras vs. YOLL*

Como se ha podido observar en el capítulo anterior, la mortalidad crónica responde a un 61% del impacto total. Por este motivo, la CRF asociada con este aspecto de salud es la que más influencia tiene sobre la estimación de los impactos. Teniendo en cuenta la importancia relativa de esta función en términos del impacto global, se ofrece en este apartado el análisis de sensibilidad que aborda la mortalidad en términos del nº de muertes prematuras.

En el capítulo cuatro hemos desarrollado los problemas asociados con el abordaje de la mortalidad crónica según el nº de muertes prematuras y la mejor consistencia de los YOLL. No obstante, con el objetivo de comparar ambas metodologías y realizar el análisis de sensibilidad, presentamos también los resultados en el caso de que se aplicara el primer método (nº de muertes prematuras) como forma alternativa de estimar los daños asociados con la mortalidad crónica. Este análisis permitirá, por un lado, analizar la variabilidad en los resultados, pero también servirá de referencia para aquellos investigadores que consideren el este método como la metodología más apropiada, en vez de los YOLL.

Pese a las inconsistencias metodológicas que podrían redundar de su utilización (Rabl, 2003), algunos estudios siguen estimando la mortalidad a través de este método. El corolario de este método alternativo consiste en estimar dicho número de muertes prematuras y multiplicarlas por el valor de una vida estadística (VSL) como coste unitario. A continuación ofrecemos un ejemplo de como calcular la mortalidad crónica mediante el nº de muertes prematuras:

**Tabla 5.12** Estimativa de los costes externos por mortalidad crónica: nº de muertes vs. YOLL

CRF - Mortalidad crónica (CM)	SCRF	UC miles US\$ 2009	Coste externo (CM) -millones US\$ (2009)-	Coste externo total -millones de US\$ (2009) (sin CO <sub>2</sub> )	% sobre el coste externo total	Coste por kg US\$ (2009)
Estimativa realizada en el caso de estudio						
YOLL (PM <sub>10</sub> )	3,76 x 10 <sup>-4</sup>	31	3,2	41,4	8%	0,61
YOLL (sulfatos)	6,29 x 10 <sup>-4</sup>	31	17,6		43%	0,64
YOLL (nitratos)	6,29 x 10 <sup>-4</sup>	31	4,7		11%	1,5
Estimativa basada en el nº de muertes						
Nº de muertes (PM <sub>10</sub> ) <sup>(b)</sup>	2,33 x 10 <sup>-5</sup>	619,2 <sup>(a)</sup>	4,2	49,2	8%	1,2
Nº de muertes (sulfatos)	3,89 x 10 <sup>-5</sup>	619,2	23,0		47%	1,25
Nº de muertes (nitratos)	3,89 x 10 <sup>-5</sup>	619,2	6,1		12%	3,0

Fuente: Elaboración propia

(a) Valor original: VSL=1.000.000€ (2004). Este valor ha sido actualizado a fecha de 2009 a partir de una tasa de descuento de un 3% (European Commission, 2005). Enseguida ha sido convertido a dólares (tipo de cambio; PPPGDP; 1€=US\$1,44) y ajustado a la realidad del caso de estudio (factor de ajuste; 0,38; véase apartado 4.3.4 en el capítulo cuatro).

(b) muertes/receptor.µgPM<sub>10</sub>/m<sup>3</sup>

Nota: CM=Mortalidad crónica; SCRF= pendiente de la función concentración-respuesta.

Nota: La pendiente de la CRF asociada con los YOLL y nº muertes ha sido calculada el capítulo anterior.

La Tabla 5.12 presenta la composición de los costes externos según ambas metodologías: YOLL y número de muertes. Se puede observar en este sentido que la estimación de los daños asociados con la mortalidad crónica a través del nº de muertes es un 16% superior con relación a los valores computados mediante los YOLL. Además, considerando el nº de muertes, el peso de la mortalidad crónica sobre el impacto total se eleva a un 68% (un 61% según los YOLL). No cabe duda, por lo tanto, de que la mortalidad crónica tiene un efecto considerable sobre la estimación del impacto total y de utilizarse la CRF basada en el nº de muertes estaríamos sobrestimando el impacto con relación a los YOLL. Esta evidencia va en línea con los argumentos mencionados en Rabl (2003) y que han sido ampliamente discutidos en el capítulo cuatro. El proyecto CAFE (AEAT, 2005) encontró, para Europa, que la estimación de la mortalidad a partir del nº de muertes es casi 3 veces más elevada con relación al método YOLL. Sin embargo, en este caso de estudio dicha relación es de solo 1,2 (nº muertes/YOLL). Esto ocurre debido a la distribución poblacional, dado que en la región del caso de estudio (Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay) hay más población joven (franja <30 años) con respecto a Europa. Así, en este caso de estudio, las personas pierden más YOLL con relación a Europa. De hecho, se ha podido comprobar en el capítulo cuatro que el promedio de los años de vida perdidos (YOLL) estimados en este caso de estudio fue de 16, mientras que en Europa el valor es de 11 YOLL.

### 5.6.3. Variabilidad relacionada con la exposición: Depletion Velocity (DV)

En el apartado relacionado con el análisis de incertidumbre se ha demostrado la importancia que tiene la *depletion velocity* (DV) o velocidad de remoción a la hora de estimar el impacto total, siendo por lo tanto un factor que supone un relativo grado de incertidumbre. La DV es la velocidad por la cual un contaminante es removido de la atmósfera y mientras más alta sea, menor será el impacto. La DV dependerá en mayor medida de las condiciones climáticas locales como, por ejemplo, la tasa de precipitación. De esta forma, climas húmedos presentarán DV más altas mientras que condiciones climáticas secas tendrán el efecto contrario. En Brasil, la DV puede variar desde valores cercanos a 2,9 cm/s (partículas) para regiones próximas a la Amazonia (alto índice pluviométrico) hasta 1,3 cm/s en el sur (Spadaro, 2011).

En este sentido, resulta oportuno estudiar la variabilidad de los resultados según diferentes valores de las DV puesto que las mismas influirán en la exposición a los contaminantes. Para ello, según una serie de valores estimados para distintas regiones del globo, se determinó para cada tipo de contaminante un valor mínimo (*lower bound*) y máximo (*upper bound*)<sup>165</sup>. A partir de estos valores se estudió la variabilidad sobre los resultados. En la Tabla 5.13 se pueden observar los valores de la DV, que han sido estimados a partir de aquellos encontrados en distintas ciudades de Europa, Estados Unidos, América del Sur y Asia.

**Tabla 5.13** Límites superior e inferior de las DV

Contaminante	DV aplicada en el caso de estudio	DV estimativas mundiales	
		LI	LS
PM10	1,57	0,5	2,5
Sulfatos	3,30	1,7	4,0
Nitratos	1,38	0,5	2,0

LI: límite inferior; LS: límite superior

Fuente: Elaboración propia

Conviene resaltar que las DV utilizadas en este caso de estudio tuvieron en cuenta una ponderación entre los valores de la DV estimados para Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay y el área de cada uno de estos países que está incluida en el dominio de impacto (Tabla 4.4). Como se puede percibir, los valores aplicados en este estudio representan aproximadamente una estimación central.

<sup>165</sup> Nota del co-director: Los valores han sido estimados según la base de datos de DV que dispone el Dr. Joseph V. Spadaro. Se han estimado según las DV encontradas en distintas ciudades de Europa, Estados Unidos, América del Sur y Asia ( $\sigma_g = 1,5$ )

Tras ejecutar nuevamente el UWM incorporando las DV mencionadas en la Tabla 5.13 se encontraron los costes externos presentados en la Tabla 5.14 y en el Gráfico 5.11.

**Tabla 5.14** Costes externos según distintas DV

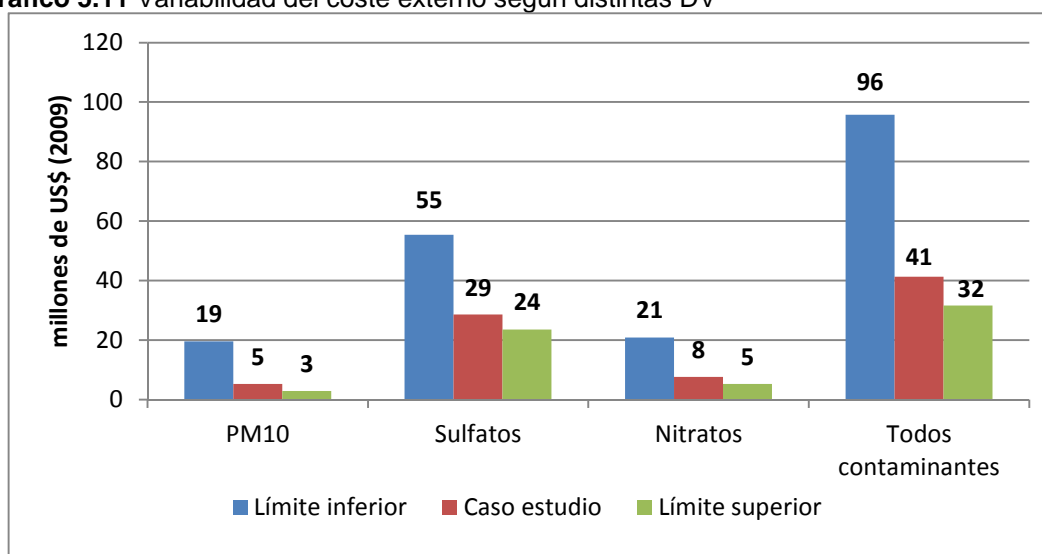
Contaminante	Caso estudio	Límite inferior		Límite superior	
		millones US\$ (2009)	$\Delta$ caso estudio	millones US\$ (2009)	$\Delta$ caso estudio
PM <sub>10</sub>	5	19	277%	3	-46%
Sulfatos	29	55	94%	24	-18%
Nitratos	8	21	176%	5	-31%
<b>Todos contaminantes</b>	<b>41</b>	<b>96</b>	<b>132%</b>	<b>32</b>	<b>-24%</b>

*Nota: No se incluye en este análisis los efectos directos del SO<sub>2</sub> puesto que representan una pequeña parte del coste externo total.*

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5.14 muestra que el coste externo total, si se aplicaran las DV relacionadas con el límite inferior, sería un 132% más elevado con relación a la estimación central realizada en este caso de estudio. Esto se da porque a menor DV, más lentamente los contaminantes son removidos de la atmósfera y, por ende, el impacto es alto. En contrapartida, teniendo en cuenta el límite superior (DV más altas) el coste externo total es un 24% menor. En el Gráfico 5.11 se puede observar el comportamiento del coste externo según las distintas DV aplicadas y para cada tipo de contaminante.

**Gráfico 5.11** Variabilidad del coste externo según distintas DV



*Nota: Los valores mencionados en "caso estudio" hacen referencia a la estimación que ha sido considerada más adecuada para valorar los costes externos, cuyos resultados han sido expuestos en el capítulo tres. No se incluye en este análisis los efectos directos del SO<sub>2</sub> puesto que representan una pequeña parte del coste externo total.*

Fuente: Elaboración propia

#### 5.6.4. Variabilidad relacionada con la toxicidad de los contaminantes

Uno de los aspectos que tienen influencia sobre el impacto total es la forma por la cual se planteen los efectos de los distintos contaminantes sobre la salud humana. Este aspecto puede producir cierta variabilidad puesto que en el caso de algunos contaminantes no hay demasiadas evidencias científicas con respecto al efecto de los mismos sobre la salud. Por este motivo, algunas investigaciones no suelen considerar sus efectos, o bien solo una parte de ellos. Es el caso, por ejemplo, de los sulfatos y nitratos. Pese a que no existe un consenso generalizado, hay ciertas evidencias que parecen apuntar que son considerados dañinos para la salud humana. No obstante, su toxicidad puede variar de un estudio a otro. Otro aspecto tiene que ver con la forma por la cual abordar sus efectos, es decir, si los mismos tienen una toxicidad equivalente a las partículas finas<sup>166</sup> (PM<sub>2,5</sub>), o bien igual a las PM<sub>10</sub>. Con respecto a las partículas, es de relativo consenso decir que las emisiones producidas por una fuente estática producen en general dos tipos de partículas: finas (PM<sub>2,5</sub>) y coarse (PM<sub>10-2,5</sub>). Ambas forman las llamadas “partículas totales en suspensión” (TSP)<sup>167</sup>. Las finas, tal y como se ha mencionado en el capítulo tres, son más peligrosas para la salud humana, en cuanto que los efectos de las partículas coarse son en algunos casos considerados despreciables. Nótese que en este caso de estudio las partículas han sido tratadas como PM<sub>10</sub> (tamaño inferior a 10 micrómetros), que en cualquier caso abarcan a las finas y las coarse. Esta elección se hizo por el hecho de que las tasas de emisión medidas para la central todavía no incluyen la clasificación en finas y coarse.

De esta forma, en los apartados que siguen se analizará la variabilidad de los resultados según la forma de abordar la toxicidad de los contaminantes.

##### 5.6.4.1. Distintos escenarios de toxicidad de los contaminantes secundarios

Determinar los roles que juegan cada uno de los contaminantes es una tarea que envuelve un cierto grado de complejidad, sobre todo porque su composición tiende a variar en función del local donde se realice el estudio. Además, no está claro hasta qué punto los efectos aparentes de la PM son, en realidad, un reflejo de los efectos de NO<sub>2</sub> o SO<sub>2</sub> o bien si la presencia de otros contaminantes afectan a la toxicidad de las PM. De esta forma, hay incertidumbre a la hora de aplicar las diferentes CRF según diferentes escenarios de toxicidad. Por este motivo, se ha

---

<sup>166</sup>En este caso las CRF para los sulfatos y nitratos serían iguales que las CRF para las partículas finas.

<sup>167</sup> TSP = PM<sub>2,5</sub> + PM<sub>10</sub>

considerado relevante investigar cómo los diferentes escenarios de toxicidad afectan a los resultados.

Para ejecutar este análisis hemos asumido tres escenarios/casos que varían en función de la toxicidad de la mezcla de los contaminantes:

- **Caso A:** Solo se considera la toxicidad de los contaminantes primarios (100% PPM y 0% SPM).
- **Caso B:** Solo se considera la toxicidad de los contaminantes primarios y de los sulfatos (100% PPM, 100% sulfatos y 0% nitratos).
- **Caso C:** Se considera toda la toxicidad de los contaminantes primarios y sulfatos y solo un 50% de los nitratos (100% PPM, 100% sulfatos y 50% nitratos).

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad a partir de los casos planteados arriba, se hace necesario incorporar factores de corrección<sup>168</sup> sobre las pendientes originales de las funciones concentración-respuesta ( $S_{CRF}$ ). El ajuste se hace necesario porque lo que se pretende en este análisis de sensibilidad es variar la toxicidad de la mezcla de los componentes de la contaminación atmosférica y no el impacto resultante. Para proceder con este análisis se debe multiplicar las pendientes de las CRF aplicadas en la estimación central del caso de estudio por los factores de corrección expuestos en la Tabla 5.15. Una vez ajustadas las pendientes de las CRF, se ejecuta el UWM con el objetivo de estimar el monto del coste externo según los casos previstos (véase Gráfico 5.12). Se puede observar en este sentido que de considerarse solamente la toxicidad de las partículas primarias (PPM) el coste externo ascendería a 7,8 millones de dólares (2009).

**Tabla 5.15** Factores de corrección, análisis de sensibilidad caso de estudio.

Sensibilidad Casos	Factor de ajuste
<b>Caso A</b> (100% PPM y 0% SPM)	1,5 $S_{CRF}$ (PM)
<b>Caso B</b> (100% PPM, 100% sulfatos y 0% nitratos).	1,14 $S_{CRF}$ (PM)
<b>Caso C</b> (100% PPM, 100% sulfatos y 50% nitratos)	1,06 $S_{CRF}$ (PM)

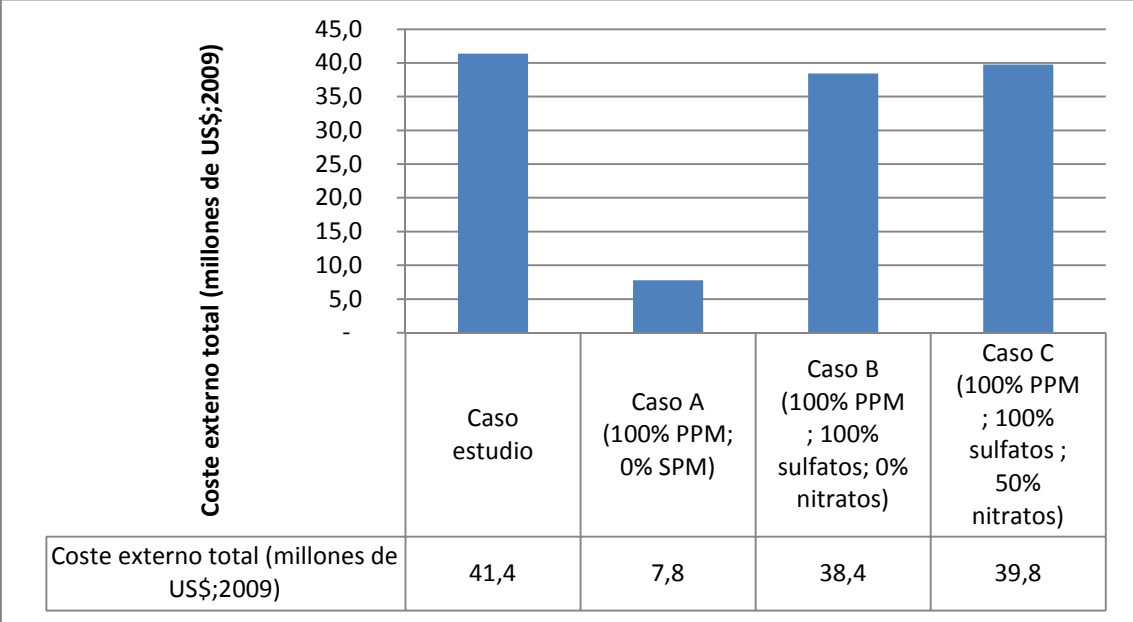
Fuente: Elaboración propia a partir de las instrucciones y estimaciones realizadas por el codirector, Dr. Joseph V. Spadaro.

<sup>168</sup> Nota del Director: Los factores de corrección aquí propuestos han sido estimados por el Dr. Joseph V. Spadaro (26 de abril de 2012).



A partir de estos tres escenarios/casos previstos se estimó la composición del coste externo, tal y como se puede observar en el Gráfico 5.12. Se puede ver claramente como los contaminantes secundarios tienen una fuerte influencia en la composición del coste externo total. Cuando solo se consideran los efectos de los contaminantes primarios (PM<sub>10</sub>) el coste externo total es de 7,8 millones de dólares. Por otro lado, una mezcla entre partículas y sulfatos sin tener en cuenta los nitratos llevaría a un coste externo de 38,4 millones de dólares (caso B). Por último, una composición que tuviese en cuenta la total toxicidad de las partículas y sulfatos y solo la mitad de los nitratos (caso C) redundaría en un coste externo del orden de 39,8 millones de dólares.

**Gráfico 5.12** Composición del coste externo total según la toxicidad de los contaminantes



Fuente: Elaboración propia

Del análisis del Gráfico 5.12 se constatar que los resultados no cambian demasiado mismo cuando no tenemos en cuenta los efectos de los nitratos. Cómo se ha mencionado anteriormente, no hay evidencias científicas claras con relación a los efectos de los nitratos sobre la salud humana. Por ende, a pesar de la incertidumbre que conlleva este contaminante, los resultados no cambian si no lo incluimos en el análisis.

Es interesante observar que los escenarios expuestos arriba serán de gran utilidad a la hora de comparar los costes externos con los costes privados asociados con cada alternativa tecnológica. En este sentido, se podrá comparar, por ejemplo, el

coste privado con el coste externo bajo una perspectiva más conservadora (Caso A: solo los contaminantes primarios) y evaluar si la solución será coste-efectiva.

#### 5.6.4.2. Toxicidad de las partículas

Otra forma de abordar la toxicidad de los contaminantes es tener en cuenta los efectos de las partículas finas ( $PM_{2,5}$ ). Conviene recordar que la estimación central del caso de estudio no tuvo en cuenta el reparto entre partículas finas ( $PM_{2,5}$ ) y coarse ( $PM_{10-2,5}$ )<sup>169</sup> sobre las emisiones totales de  $PM_{10}$ . Como se ha señalado en el capítulo 4, no se diferenció la toxicidad de los diferentes componentes de las PM, hecho que va en línea con la metodología propuesta en el proyecto CAFE (AEAT, 2005). No obstante, en este análisis de sensibilidad se valorará el daño teniendo en cuenta las toxicidades de las  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10-2,5}$ . Conviene apuntar que al contrario del proyecto CAFE, el NEEDS (NEEDS, 2007) sí que promueve dicho reparto.

De esta forma, para realizar dicho análisis hace falta conocer el reparto entre las partículas finas y coarse en el aire. Tal y como hemos discutido ampliamente en el capítulo cuatro, mezcla en el aire entre partículas finas y coarse suele variar de un país a otro. De esta forma, para realizar este análisis de sensibilidad hemos adoptado la relación 40% en finas y un 60% en coarse. Además, hay que tener en cuenta las nuevas CRF asociadas con cada una de ellas (véase Tabla 5.17). El criterio para establecer las nuevas funciones concentración-respuesta (CRF) considera que las partículas finas ( $PM_{2,5}$ ) tienen una toxicidad equivalente a los nitratos y sulfatos ( $S_{CRFPM_{2,5}} = S_{CRFsulfatos,nitratos}$ ). De esta manera, como se puede observar en la Tabla 5.17, en este análisis de sensibilidad se introdujo en el UWM las CRF para las partículas finas teniendo en cuenta los mismos valores de pendiente de los sulfatos y nitratos calculados en la estimación central del caso de estudio<sup>170</sup>. Con relación a las CRF para las partículas coarse ( $PM_{10-2,5}$ ), las mismas asumen los mismos valores de pendiente de las  $PM_{10}$  pero no incluye la mortalidad crónica, los días de trabajo perdidos (WDL), los días de actividad restringida menor (*mRAD*) y neta (*netRAD*).

---

<sup>169</sup> Las  $PM_{2,5}$  tienen un tamaño inferior a 2,5 micrómetros. Las  $PM_{10-2,5}$  (coarse) tienen un tamaño de entre 10 y 2,5 micrómetros.

<sup>170</sup> Conviene recordar, tal y como se ha explicado en el capítulo 4, que las pendientes asociadas a los sulfatos y nitratos se obtuvieron a partir de la siguiente relación:  $S_{CRF(sulfatos, nitratos, PM_{2,5})} = 1,67 \times S_{CRF(PM_{10})}$ .

**Tabla 5.16** Estimación de los costes externos teniendo en cuenta las PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10-2,5</sub>

Contaminante	US\$/Kg	Emisiones <sup>(a)</sup> toneladas/año	Coste externo total millones de US\$ (2009)
<b>PM<sub>2,5</sub></b>	2,2	2.090	4,7
<b>PM<sub>10-2,5</sub></b>	0,08	3.136	0,24
<b>SO<sub>2</sub></b>	-	27.654	-
<i>Sulfatos (por kg de SO<sub>2</sub>)</i>	0,85	-	23,5
<b>NO<sub>x</sub></b>	-	3.058	-
<i>Nitratos</i>	2,0	-	6,12
<b>Total</b>			<b>35</b>

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las DV utilizadas para las partículas fueron: PM<sub>2,5</sub> 1,04 cm/s, PM<sub>10-2,5</sub> : 2,61 cm/s. Para los sulfatos y nitratos las DV son las mismas aplicadas en la estimación central del caso de estudio.

(a) Las emisiones han sido estimadas teniendo en cuenta que un 40% de las emisiones de PM<sub>10</sub> son finas (PM<sub>2,5</sub>) y un 60% coarse (PM<sub>10-2,5</sub>)

Tras establecer la distribución entre partículas finas y coarse, así como las CRF para cada uno de los contaminantes, podemos estimar el coste externo total según este escenario. Como se puede observar en la Tabla 5.16, la estimación de los impactos teniendo en cuenta la toxicidad de las partículas finas y coarse (desglose de las PM<sub>10</sub>) supondría un coste externo un 17% menor con relación al enfoque fundamentado en las PM<sub>10</sub>.

**Tabla 5.17** CRF para las partículas finas y coarse

Aspecto de salud	Pendiente (SCRF)	Unidad
<b>CRF para las PM<sub>2.5</sub>, Sulfatos y Nitratos</b>		
Mortalidad crónica (CM)	<b>6,29E-04</b>	<i>YOLL anuales por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Días de trabajo perdidos (WDL)	<b>2,34E-02</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Días de actividad restringida menor (mRAD)	<b>3,44E-02</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Días de actividad restringida neta (netRAD)	<b>3,49E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Mortalidad infantil (IF)	<b>4,47E-07</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Bronquitis crónica (CB)	<b>2,45E-05</b>	<i>nuevos casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	<b>1,17E-05</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	<b>7,24E-06</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	<b>5,99E-02</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	<b>3,39E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	<b>3,15E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	<b>2,53E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3</math></i>
<b>CRF para las PM<sub>10-2.5</sub> (coarse)</b>		
Mortalidad infantil (IF)	<b>2,68E-07</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Bronquitis crónica (CB)	<b>1,46E-05</b>	<i>nuevos casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	<b>7,03E-06</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	<b>4,34E-06</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	<b>3,59E-02</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	<b>2,03E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	<b>1,89E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	<b>1,51E-03</b>	<i>casos por año por persona por <math>\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3</math></i>

Fuente: Elaboración propia a partir de las recomendaciones del proyecto NEEDS (NEEDS, 2007) y CAFE (AEAT, 2005).

#### 5.6.5. Costes unitarios (UC)

Una de las fuentes de variabilidad sobre los resultados es la forma por la cual se plantean los costes unitarios (UC). La sensibilidad de los UC puede darse por tres vías fundamentales. La primera tiene que ver con el tratamiento de la mortalidad (YOLL vs. nº de muertes), tal y como hemos observado anteriormente. La segunda fuente de variabilidad tiene que ver con la utilización del PIB per cápita en vez del PIB per cápita en términos de poder adquisitivo (PPPGDP per cápita). Por último, la tercera fuente sería plantear los UC a partir de diferentes elasticidades renta de la disposición a pagar ( $\gamma$ ). Bajo este último enfoque, conviene señalar que en este caso de estudio la  $\gamma$  utilizada ha sido de 0,8.

##### 5.6.5.1. PIB per cápita vs. PPPGDP per cápita

En el capítulo cuatro hemos discutido de forma exhaustiva la metodología que debe ser aplicada cuando se desee transferir los UC de una región a otra. Como se ha mencionado anteriormente, gran parte de dichos costes han sido estimados para realidades (*policy study*) ajenas al sitio donde se quiera llevar a cabo el análisis (*policy site*). De esta manera, tal y como se ha explicado en el capítulo cuatro, la transferencia de los UC se da a través del mecanismo *benefit transfer* (BT). El BT tiene en cuenta la relación entre el PIB per cápita en términos de poder adquisitivo (PPPGDP per cápita) de los países donde se quiera realizar el estudio y el del país o región donde se llevó a cabo dicho estudio. Además, aplica la elasticidad renta de la disposición a pagar.

No obstante, aunque no sea la forma considerada más adecuada, una posibilidad sería transferir los UC aplicando el PIB per cápita en vez del PPPGDP per cápita. Tal y como hemos discutido en el capítulo cuatro, el PPPGDP per cápita es el mecanismo más adecuado para transferir los costes unitarios hacia otros contextos, puesto que “capta” las diferencias de renta y poder adquisitivo de los países afectados en el análisis (Czajkowski & Ščasný, 2010).

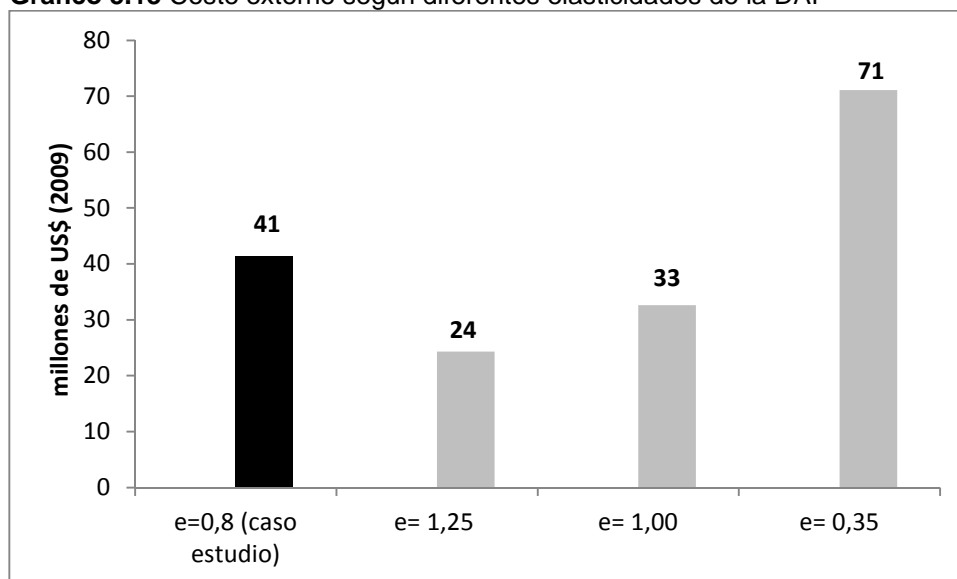
Por ello, en este análisis de sensibilidad ofrecemos la composición de los costes externos en el caso de que el analista prefiera utilizar el PIB per cápita en vez del PPPGDP per cápita. Utilizar el PIB per cápita supone de esta manera subestimar el coste externo total en un 28%. El monto total alcanzado bajo esta metodología es de 29,9 millones de dólares estadounidenses, frente a 41,4 millones a partir de la

estimación central. En la Tabla 5.18 presentamos los costes externos según ambas metodologías (PIB per cápita vs. PPPGDP per cápita).

#### 5.6.5.2. Sensibilidad a partir de distintas elasticidades renta de la DAP

En el capítulo cuatro se ha discutido ampliamente la aplicación de distintas elasticidades renta de la disposición a pagar ( $\gamma$ ) a la hora de ejecutar el *benefit transfer*. Tal y como se ha podido comprobar, el valor elegido en este caso de estudio ha sido de 0,8, según las distintas recomendaciones ofrecidas por la literatura como, por ejemplo, en Ortiz *et ál.* (2011). No obstante, debido a que no hay un consenso generalizado con respecto al valor de la  $\gamma$  cuando se trate de transferir valores hacia países en vías de desarrollo, se ofrece en este apartado la variabilidad en los resultados a partir de distintos valores de  $\gamma$ . Como se puede observar en el Gráfico 5.13 de aplicarse una  $\gamma$  de 0,35 supondría prácticamente duplicar el coste externo total (un 73% más alto) con respecto a la estimación realizada en el caso de estudio. En contrapartida, estimarlo mediante una elasticidad 1,25 reduciría el coste en un 41%. La  $\gamma$  igual a 1,00 reduce el coste externo en un 20%.

**Gráfico 5.13** Coste externo según diferentes elasticidades de la DAP



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.18** Estimativa de los costes externos según el PPPGDP per cápita o PIB per cápita.

Afección	Nº de casos						Estimación realizada en el caso de estudio (PPPGDP per cápita)		Estimación realizada a partir del PIB per cápita	
	Unidad	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	Nitratos	Sulfatos	Total	Coste unitario por afección (US\$ 2009)	Coste externo total por afección (miles de US\$ 2009)	Coste unitario por afección (US\$ 2009)	Coste externo total por afección (miles de US\$ 2009)
<b>Mortalidad</b>		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mortalidad crónica (CM)	YOLLS/año	103	-	150	568	822	30.962	25.435.338	22.396	18.398.201
Mortalidad infantil (IF)	muerres/año	0,001	-	0,001	0,004	0,01	928.862	5.690	671.876	4.116
Mortalidad aguda (AM)	muerres/año	-	3	-	-	3	30.962	95.951	22.396	69.405
<b>Morbilidad</b>		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bronquitis crónica (CB)	nuevos casos/año	4	-	6	23	33	123.848	4.109.285	89.583	2.972.379
Días de trabajo perdidos (WDL)	días/año	4.079	-	5.925	22.410	32.414	157	5.078.238	113	3.673.254
Días de actividad restringida menor (mRAD)	días/año	5.859	-	8.553	32.340	46.752	26	1.217.250	19	880.476
Días de actividad restringida neta (netRAD)	días/año	4.791	-	6.976	26.380	38.147	87	3.318.765	63	2.400.570
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	ingresos/año	2	-	3	11	15	1.360	20.788	983	15.037
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	ingresos/año	1	-	2	7	9	1.360	12.860	983	9.302
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	casos/año	10.240	-	14.930	56.470	81.640	24	1.970.072	17	1.425.017
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	casos/año	580	-	843	3.189	4.613	0,6	2.929	0,5	2.119
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	casos/año	534	-	777	2.936	4.246	24	102.471	17	74.120
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	casos/año	427	-	624	2.358	3.409	0,6	2.165	0,5	1.566
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO <sub>2</sub>	ingresos/año	-	4	-	-	4	1.360	6.087	983	4.403
							<b>Total</b>	<b>41.378</b>	<b>Total</b>	<b>29.930</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.6.6. *Apuntes finales*

El análisis de sensibilidad planteado en este estudio tuvo por objetivo investigar cómo la incertidumbre se distribuye entre los distintos aspectos analizados y fundamentalmente su influencia sobre los resultados. Para ello, se han propuesto distintas simulaciones con el objetivo de analizar su influencia sobre los resultados, permitiéndonos de esta manera comprender mejor las diferentes fuentes de incertidumbre. A continuación, presentamos un resumen de las principales constataciones que redundaron del análisis de sensibilidad:

- a.) *Datos meteorológicos y ubicación de la central (siting)*: Hemos observado que los efectos de los contaminantes y, por ende, el coste externo total son muy sensibles a la ubicación de la central (urbana o rural).
- b.) *Funciones concentración-respuesta: Número de muertes prematuras vs. YOLL*: Se observó que estimar la mortalidad a partir del nº de muertes supone sobrestimar el impacto, aunque las evidencias verificadas en este caso de estudio demuestran que dicha diferencia no es muy elevada, debido a las diferencias en la distribución poblacional. Cabe resaltar que en Europa el método vinculado con el nº de muertes es casi 3 veces más elevado con relación al método YOLL.
- c.) *Variabilidad relacionada con la exposición: Depletion Velocity (DV)*: Hay una relativa variabilidad con respecto a las DV. Se ha podido comprobar que se trata de un parámetro muy importante para la estimación de los daños y, por ende, también supone gran incertidumbre. Cabe resaltar que las DV utilizadas en la estimación del caso de estudio se posicionan como valores centrales, con relación a los límites inferior y superior planteados en el análisis de sensibilidad.
- d.) *Variabilidad relacionada con la toxicidad de los contaminantes*: Se puede ver claramente como los contaminantes secundarios tienen una fuerte influencia en la composición del coste externo total. Por otro lado, la estimación de los impactos teniendo en cuenta la toxicidad de las partículas finas y coarse supondría un coste externo un 17% menor con relación al enfoque planteado en el caso de estudio.



e.) Costes unitarios: Utilizar el PIB per cápita supone de esta manera subestimar el coste externo total en un 28%. Las diferentes elasticidades renta de la DAP también son criterios que influyen en los resultados a la hora de ejecutar el *benefit transfer*. El valor de la elasticidad utilizada en el caso de estudio (0,8) se configura como el valor central entre aquellos planteados en el análisis de sensibilidad.

En la Tabla 5.19 se presentan las distintas simulaciones realizadas en cada uno de los análisis de sensibilidad.

**Tabla 5.19** Cuadro resumen del análisis de sensibilidad

Aspecto de salud	Sensibilidad Costes Unitarios (UC) (PPPGDP per cápita vs PIB per cápita)		Sensibilidad Costes Unitarios (UC) (diferentes elasticidades)			Sensibilidad - Toxicidad		
	UC PPPGDP per cápita	UC GDP per cápita	$\gamma = 1,25$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,35$	Caso A	Caso B	Caso C
						100% PPM 0% SPM	100% PPM 0% Nitratos 100% Sulfatos	100% PPM 100% Sulfatos 50% Nitratos
	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)	Coste externo total (US\$ 2009)
<b>Mortalidad</b>								
Mortalidad crónica (CM)	25.435.338	18.398.201	14.952.899	20.063.960	43.691.039	4.778.995	23.691.182	24.495.051
Mortalidad infantil (IF)	5.690	4.116	3.345	4.488	9.774	1.022	5.292	5.476
Mortalidad aguda (MA)	95.951	69.405	56.408	75.689	164.819	-	-	-
<b>Morbilidad</b>								
Bronquitis crónica (CB)	4.109.285	2.972.379	2.415.762	3.241.496	7.058.642	773.185	3.827.863	3.957.542
Días de trabajo perdidos (WDL)	5.078.238	3.673.254	2.985.389	4.005.827	8.723.042	958.574	4.730.977	4.890.956
Días de actividad restringida menor (mRAD)	1.217.250	880.476	715.595	960.194	2.090.906	228.820	1.133.800	1.172.260
Días de actividad restringida neta (netRAD)	3.318.765	2.400.570	1.951.032	2.617.916	5.700.742	625.221	3.091.518	3.196.230
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	20.788	15.037	12.221	16.398	35.709	3.926	19.367	20.022
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	12.860	9.302	7.560	10.145	22.091	2.423	11.980	12.385
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	1.970.072	1.425.017	1.158.164	1.554.037	3.384.052	370.655	1.835.164	1.897.329
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	2.929	2.119	1.722	2.311	5.032	553	2.729	2.821
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	102.471	74.120	60.240	80.831	176.017	19.325	95.456	98.688
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	2.165	1.566	1.273	1.707	3.718	407	2.016	2.085
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO2	6.087	4.403	3.578	4.802	10.456	-	-	-
<b>Total</b>	41.377.891	29.929.965	24.325.190	32.639.800	71.076.039	7.763.106	38.447.343	39.750.844

Fuente: Elaboración propia

(continua en la página siguiente)

(continuación)

Aspecto de salud	Toxicidad PM (finas y coarse)	Sensibilidad <i>Siting</i>			Sensibilidad YOLL vs nº muertes	Sensibilidad DV	
	Coste externo total (US\$ 2009)	SUWM/RUWM Δ %			Coste externo total nº muertes total (US\$ 2009)	Límite inferior Coste externo total (US\$ 2009)	Límite superior Coste externo total (US\$ 2009)
<b>Mortalidad</b>	-	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>Sulfatos</b>	<b>Nitratos</b>	-	-	-
Mortalidad crónica (CM)	25.857.710	10%	5%	5%	33.307.133	59.000.000	19.459.000
Mortalidad infantil (IF)	3.706	10%	-1%	-1%	5.690	13.146	4.361
Mortalidad aguda (MA)	82.963	-	-	-	-	95.960	95.960
<b>Morbilidad</b>	-	-	-	-	-	-	-
Bronquitis crónica (CB)	2.659.999	6%	1%	1%	4.109.285	9.532.000	3.143.200
Días de trabajo perdidos (WDL)	3.095.403	3%	-1%	1%	5.078.238	11.808.000	3.891.300
Días de actividad restringida menor (mRAD)	1.234.676	6%	1%	1%	1.217.250	2.819.400	929.850
Días de actividad restringida neta (netRAD)	498.076	10%	5%	5%	3.318.765	7.700.000	2.539.000
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	13.503	10%	5%	5%	20.788	48.257	15.903
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	8.328	10%	5%	5%	12.860	29.848	9.839
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	1.274.927	6%	1%	1%	1.970.072	4.545.500	1.498.600
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	1.897	11%	6%	6%	2.929	6.423	2.117
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	66.292	7%	2%	2%	102.471	236.480	77.952
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	1.399	13%	7%	8%	2.165	4.744	1.564
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO2	4.767	10%	-	5%	-	6.089	6.089
<b>Total</b>	34.803.645	<b>8%</b>	<b>3%</b>	<b>3%</b>	49.147.648	95.845.847	31.674.734

## **Capítulo 6 : Alternativas tecnológicas y economía de la zona**

## 6.1. Premisa inicial

En el capítulo cuatro se ha realizado la valoración económica de las externalidades producidas por la central termoeléctrica de Candiota. Como se ha podido comprobar, las afecciones sobre la salud humana ponen de manifiesto la necesidad de proponer planteamientos relacionados con la regulación de la actividad y la consecuente mitigación de los daños. Por otro lado, es importante resaltar que el municipio de Candiota depende económica y socialmente de la economía del carbón (minería). También conviene señalar que la planificación energética de Brasil parece apuntar hacia una tendencia de explotación continua de los yacimientos de carbón con fines energéticos. Tal hecho se comprueba tras la puesta en marcha de la tercera fase (Fase C)<sup>171</sup> de la termoeléctrica que, a principios del 2011, añadió 350 MW a los ya existentes 446MW de potencia. En esta misma línea, la Empresa Brasileña de Investigación Energética (EPE, en portugués) estima un potencial de 28.000 MW en generación termoeléctrica a carbón. En la actualidad, dicha fuente de generación dispone de una capacidad instalada total de 1.415 MW, siendo Candiota responsable de un 32% de esta capacidad (solo incluye las Fases A y B).

Teniendo en cuenta las dos variables mencionadas arriba, podría resultar difícil imaginar el cese de la actividad (minería) como alternativa a la solución del problema. Como se verá más adelante, gran parte de los puestos de trabajo (directos e indirectos) dependen de la explotación del recurso. Por otro lado, pese a que la contaminación es percibida como un efecto negativo, los habitantes otorgan gran valor a los beneficios económicos que aporta. Además, como se ha visto en el párrafo anterior, los planes de expansión de la oferta no parecen apuntar hacia un eventual abandono del carbón como recurso energético.

En este sentido, puede que no quepa otra posibilidad que plantear la reducción de las externalidades a partir de un cambio generacional de la tecnología empleada en la central. Este planteamiento podría permitir una actuación sin mermar la economía de la zona. Es precisamente bajo este enfoque que se enmarca este capítulo, cuyo objetivo fundamental es plantear las posibles alternativas relacionadas con la aplicación de tecnologías limpias del carbón (Clean Coal Technologies, CCT en adelante) u otras alternativas que permitan reducir las emisiones de contaminantes. Cabe recordar que la tecnología empleada actualmente en la central (carbón

---

<sup>171</sup> <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=144> (consulta realizada el 28 de febrero de 2012)

pulverizado) fue implantada en la década de los 80, cuando el control de emisiones no era tan estricto.

A nuestro modo de ver, el problema de la contaminación atmosférica y, por ende, del daño sobre la salud humana, podría verse reducido si se planteara un cambio tecnológico en las Fases A y B de la central, aplicando algunas alternativas disponibles en el mercado con mejores niveles de eficiencia ambiental. Para ello, se ha estimado la inversión necesaria para acometer cada una de las propuestas tecnológicas. Además, con el objetivo de ofrecer una comparación coherente, se han actualizado a valor presente los costes externos teniendo en cuenta una vida útil de 30 años. Valga lo anterior para aclarar que el objetivo de esta investigación no es comparar los costes externos con el coste privado asociado con cada tecnología, sino ofrecer informaciones adicionales que podrían servir de parámetro para el planificador a la hora de decidir qué acción acometer. Conscientes de la evidente inconsistencia que redundaría de realizar dicha comparación, expondremos los beneficios sociales que supondría implementar cada tecnología junto con su correspondiente coste privado sin querer por lo tanto alcanzar una decisión firme al respecto. Dicha decisión sobre la alternativa coste-eficiente pasaría por realizar un detallado análisis coste-beneficio que incorporaría los costes externos analizados en esta investigación. Evidentemente, la complejidad temporal y material de este tipo de análisis superaría con creces el objetivo planteado en esta tesis. Sin embargo, a nuestro juicio, esto no impide proporcionar un ensayo sobre los beneficios sociales que traería cada tecnología y, obviamente, qué coste de capital requeriría.

En definitiva, la información que queremos ofrecer en este capítulo va en dos líneas fundamentales. En primer lugar, conocer los beneficios sociales derivados de la reducción de las emisiones que generaría cada tecnología con relación al caso de la termoeléctrica de Candiota. Por otro lado, se analizarán los costes de capital, operación y mantenimiento (O&M) y consumo de combustible de cada opción tecnológica. Con carácter complementario, dada la incertidumbre estudiada en el capítulo cuatro, se plantearán distintos escenarios que harían variar los costes externos. Dichos escenarios coinciden, en mayor medida, con el análisis de sensibilidad planteado en el capítulo anterior. Para lograr este objetivo, se ha estructurado el capítulo en tres partes fundamentales. La primera analiza la importancia de la actividad de la minería para la economía de la zona. La segunda presenta una breve descripción de las CCT disponibles en el mercado, así como sus principales características. Por último, se presentan los resultados asociados con el

beneficio social que aporta cada opción así como la inversión necesaria para llevarla a cabo.

## **6.2. La importancia de la minería del carbón para la economía del municipio de Candiota**

El municipio de Candiota, al igual que las demás regiones vecinas, tiene una tradicional vinculación con la actividad agrícola. Antes de la implantación del complejo termoeléctrico y del uso del carbón con fines energéticos, la agricultura y la ganadería eran la principal actividad de la región. Hay raíces históricas vinculadas con la charcutería, donde el carbón era uno de los insumos energéticos empleados en la elaboración del charque<sup>172</sup>.

Las principales fuentes de ingreso del municipio son, además del aprovechamiento energético del carbón, la pecuaria extensiva y la agricultura. La renta familiar media de los residentes se sitúa en unos 600 reales, aproximadamente 300 dólares<sup>173</sup> (Fritz *et ál.*, 2003). Es notoria la diferencia de ingresos entre hombres y mujeres. Un individuo del sexo masculino percibe en Candiota aproximadamente unos 714 reales (357 dólares), mientras que una mujer percibe casi un 50% menos.

En comparación con municipios vecinos, Candiota dispone del PIB per cápita más elevado (R\$ 28.784,76)<sup>174</sup> incluso con relación al municipio de Bagé, que no dispone de yacimientos de carbón, y cuyo número de habitantes es trece veces superior. En el Gráfico 6.1 podemos observar claramente esta diferencia sobre todo cuando visualizamos aquellos municipios vecinos en cuyos territorios se encuentra presente el yacimiento de Carbón (Candiota, Hulha Negra, Aceguá y Pedras Altas). Dichos municipios tienen un PIB per cápita, a veces, superior (Candiota y Aceguá) al encontrado en la Capital (Porto Alegre) del Estado (Rio Grande do Sul). La Tabla 6.1 brinda más detalles de los municipios vecinos a Candiota, así como, a efectos comparativos, de la capital del estado. Con relación al valor añadido proporcionado por las distintas actividades económicas (véase Gráfico 6.2 ), observamos que en Candiota la actividad industrial está por encima de la actividad agrícola y del sector

---

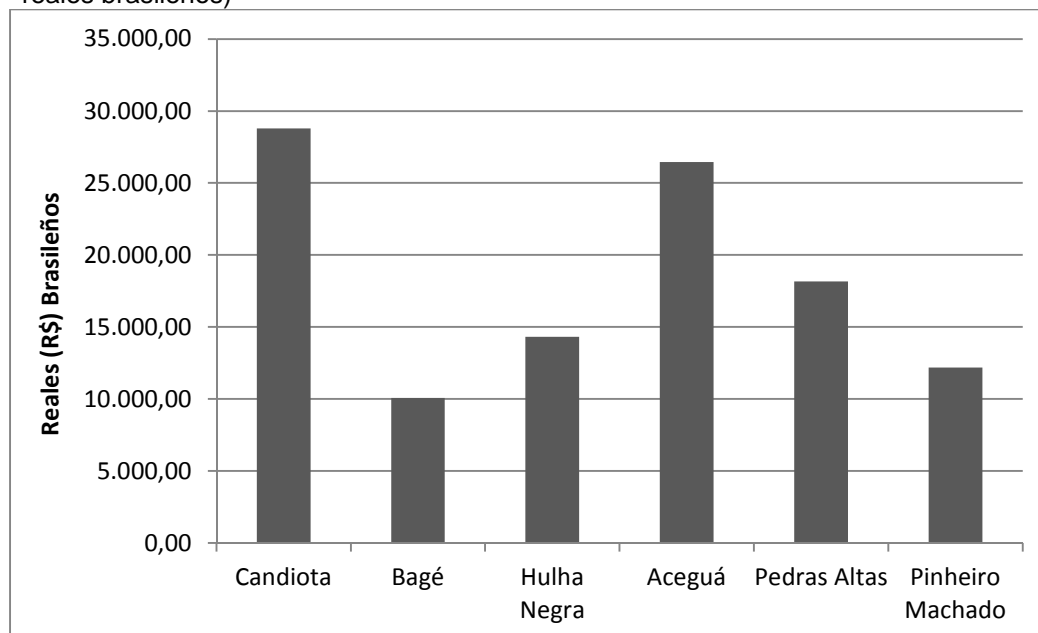
<sup>172</sup>El charque es la carne deshidratada. Se prepara cubriéndola con sal y exponiéndola al sol. Era la forma rudimentaria de conservar la carne antes de la aparición del refrigerador.

<sup>173</sup>Cambio del 28 de mayo de 2012. (1 dólar=2,00 reales). Fuente: Banco Central do Brasil <http://www.bc.gov.br/> (consulta realizada el 28 de mayo de 2012)

<sup>174</sup>Unidad monetaria brasileña: Reales (R\$)

terciario, posiblemente gracias a la presencia de empresas que utilizan el carbón como insumo energético.

**Gráfico 6.1** PIB per cápita (2009), comparativa con municipios vecinos a Candiota (R\$; reales brasileños)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de *IBGE*<sup>175</sup> *Cidades*: [www.ibge.gov.br/cidadesat](http://www.ibge.gov.br/cidadesat). Consulta realizada el 17 de mayo de 2012.

**Tabla 6.1** Datos económicos de los municipios pertenecientes a la región de Candiota (2009)

Municipio	Población <i>nº habitantes</i>	Ingresos Presupuestarios <i>miles de reales R\$</i>	PIB per cápita <i>Reales; R\$</i>	PIB total <i>miles de reales R\$</i>	Valor añadido por la industria (VAI) <i>miles de reales R\$</i>	% VAI/PIB
Candiota	8.826	29.823	28.784,76	246.858	134.782	55%
Bagé	116.944	149.710	10.072,98	1.165.897	154.968	13%
Hulha Negra	6.096	10.760	14.313,01	92.290	32.520	35%
Aceguá	4.430	11.061	26.455,19	115.001	8.952	8%
Pedras Altas	2.188	8.418	18.160,53	47.907	2.341	5%
Pinheiro Machado	12.710	20.464	12.187,85	160.295	35.173	22%
Porto Alegre**	1.413.094	3.122.662	26.312,45	37.787.913	4.652.975	12%

\*\* Capital del Estado. No forma parte de la región geográfica estudiada.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de *IBGE Cidades*: [www.ibge.gov.br/cidadesat](http://www.ibge.gov.br/cidadesat). Consulta realizada el 17 de mayo de 2012.

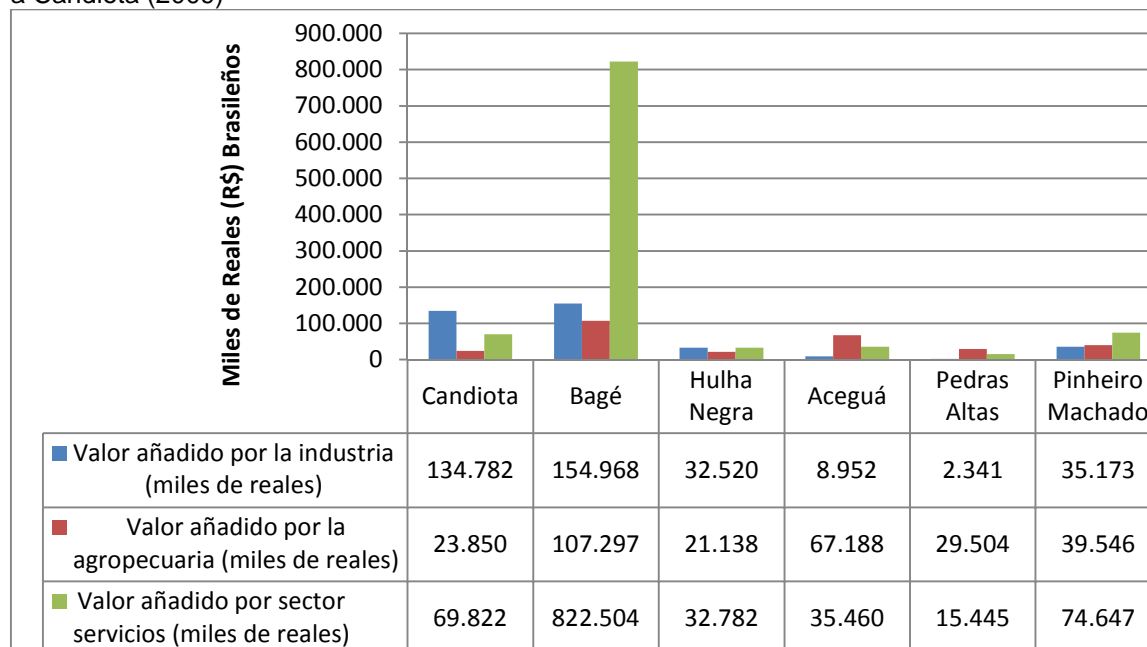
La actividad de la minería y su influencia sobre la economía local reviste gran relevancia a la hora de establecer eventuales criterios de decisión relacionados con la reducción de los impactos. No cabe duda de que la región de Candiota es muy dependiente de la explotación económica del carbón. Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, las características morfológicas del insumo no hacen

<sup>175</sup> Instituto Brasileño de Geografía y Estadística



viable su transporte hacia otros centros, obligando a que las industrias se instalen cerca de las zonas de extracción.

**Gráfico 6.2** Comparativa entre el valor añadido por las distintas actividades: municipios vecinos a Candiota (2009)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de *IBGE Ciudades*: [www.ibge.gov.br/cidadesat](http://www.ibge.gov.br/cidadesat). Consulta realizada el 17 de mayo de 2012.

Adicionalmente, la actividad afecta de lleno al empleo. En el estudio realizado por Fritz et ál (2003), un 54% de los entrevistados (véase Tabla 6.2 ) afirmaron estar vinculados laboralmente de forma directa con la termoeléctrica o empresa de minería. Como se puede observar, el impacto económico relacionado con la explotación del carbón es elevado. Para hacerse una idea, solamente la inversión destinada a la construcción de la Fase C, unos 1.200 mil millones de reales brasileños, corresponde a la suma del PIB del municipio de 1997 a 2005.

**Tabla 6.2** Estructura del empleo en Candiota (% de personas)

Fuentes de Ingreso	%
Jubilados empresa de minería	5
Jubilados central termoeléctrica	12
Jubilados no identificados	5
Empleados cementeras	5
Empleados minería	7
Empleados central termoeléctrica	25
Actividades comerciales	21
Trabajos domésticos	2
Electricistas, albañiles, soldadores, administrativos, etc.	9
Funcionarios	4
Otros trabajos	4
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: Fritz *et ál.* (2003)

#### 6.2.1. Los efectos multiplicadores sobre la estructura productiva

Los datos económicos mencionados arriba nos permiten intuir que los efectos multiplicadores que proporciona la actividad (minería) sobre la renta y el empleo locales son muy relevantes. Para tener una idea aproximada de estos impactos, se han calculado los efectos multiplicadores sobre la renta, producción y empleo local. El cálculo de estos valores tuvo en cuenta el método del *multiplicador Keynesiano local* (Bleaney *et ál.*,1992).

El *multiplicador Keynesiano local* considera que el **gasto básico** de una institución es la suma del gasto en mano de obra **L** (al que se le ha restado la filtración inicial que supone que algunos empleados residan fuera de la localidad) y en compras de bienes y servicios, **G**.

$$\text{Gasto}_{\text{básico}} = L + G$$

*Ecuación 6-1*

Además, con el fin de incorporar el efecto filtración de los gastos en compras, se define un parámetro representativo del porcentaje de las compras de producción local, **h**. De esta forma, el impacto de primera ronda sobre la producción bruta, **Y<sub>1</sub>**, viene dado por:

$$Y_1 = L + (h \times G)$$

*Ecuación 6-2*

Para convertir la producción bruta en renta disponible,  $D_1$ , se descuentan los impuestos directos e indirectos; % ( $t$  e  $i$ , respectivamente) y los ingresos de la mano de obra no local (empleados especializados),  $M$ .

$$D_1 = (1 - t) \times (Y_1 - M - (h \times i \times G))$$

*Ecuación 6-3*

A partir del cálculo de la renta disponible  $D_1$  podemos calcular el incremento de segunda ronda:

$$Y_2 = (w \times c \times D_1) + (w \times c \times (1 - t') \times M)$$

*Ecuación 6-4*

Donde  $w$  es el porcentaje de consumo local,  $c$  es la propensión marginal a consumir y  $t'$  es la tasa de impuesto directo cargada a los trabajadores especializados. Para transformar el incremento de segunda ronda en la renta disponible,  $D_2$ , utilizamos la siguiente expresión:

$$D_2 = (1 - t) \times (1 - i) \times Y_2$$

*Ecuación 6-5*

A partir de la tercera ronda, el cálculo viene dado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Y_3 &= w \times c \times D_2 \\ D_3 &= (1 - t) \times (1 - i) \times Y_3 \end{aligned}$$

*Ecuación 6-6*

Este procedimiento se repite hasta que los efectos se vuelvan inapreciables. La producción bruta y la renta disponible final, resultante de las sucesivas rondas de transacciones económicas, es el efecto acumulado de cada una de ellas.

$$\begin{aligned} Y_f &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots \\ D_f &= D_1 + D_2 + D_3 + \dots \end{aligned}$$

*Ecuación 6-7*

El *multiplicador Keynesiano local* para la producción  $M_Y$  se define como el cociente entre el impacto directo sobre la producción y el impacto final, y de forma análoga, el multiplicador para la renta disponible  $M_D$ :

$$M_Y = \frac{Y_f}{Y_1} ; M_D = \frac{D_f}{D_1}$$

Ecuación 6-8

Por último, la estimación del impacto sobre el empleo se calcula restando a la producción total obtenida  $Y_f$ , el gasto en mano de obra  $L$  y, a continuación, dividiendo el resultado por el salario promedio bruto  $S$  anual para puestos de trabajo a tiempo completo.

En la Tabla 6.3 presentamos las informaciones que fueron utilizadas en el *multiplicador Keynesiano local*.

**Tabla 6.3** Informaciones utilizadas en el multiplicador Keynesiano local

Concepto	Símbolo	Valor
Salarios locales (empleados que viven dentro del área de estudio) <sup>(a)</sup>	L	35.701 (miles de R\$)
Compras bienes y servicios (termoeléctrica de Candiota) <sup>(a)</sup>	G	109.382 (miles de R\$)
Compras de producción local (%) <sup>(b)</sup>	h	80%
Impuestos directos (%) <sup>(c)</sup>	t	15%
Impuestos indirectos (%) <sup>(d)</sup>	i	17%
Ingresos mano de obra no local (empleados especializados termoeléctrica) <sup>(a)</sup>	M	3.570 (miles de R\$)
Consumo local (%) <sup>(e)</sup>	w	43%
Propensión marginal a consumir (%) <sup>(f)</sup>	c	75%
Impuestos directos mano obra especializada (%) <sup>(g)</sup>	t'	27,5%
Salario bruto anual a tiempo completo <sup>(a)</sup>	S	36.196 (Reales R\$)

(a) Valores presentes en el informe de sostenibilidad de la CGTEE (CGTEE, 2010) que es la empresa estatal que administra la central termoeléctrica de Candiota.

(b) Se estimó que un 80% de las compras se realiza localmente, sobre todo debido a la adquisición de carbón de la minería.

(c) ICMS (Impuesto a la circulación de bienes y servicios). Tipo impositivo básico.

(d) Tipo del impuesto de la renta para el perfil de remuneración de los empleados no especializados de la central de Candiota.

(e) Valor estimado según la encuesta de presupuestos familiares (tabla 1.3.23.1) correspondiente al Estado de Rio Grande do Sul. Disponible en: [www.ibge.gov.br/home/xml/pof\\_2008\\_2009.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/xml/pof_2008_2009.shtm) (consulta realizada el 17 de mayo de 2012).

(f) Valor de la propensión (Brasil) mencionado en Pereira, T. *et al* (2011).

(g) Tipo del impuesto para rentas altas, según el perfil de remuneración de los empleados especializados de la central.

Fuente: Elaboración propia a partir de: CGTEE (2010)

Tras ejecutar dicho análisis se detectó que el impacto agregado sobre la producción  $Y_f$  asciende a 161,5 millones de reales (R\$) brasileños (aproximadamente 81 millones de dólares). El impacto agregado sobre la renta es de 116 millones de reales brasileños (58 millones de dólares). El impacto sobre el empleo es de 3.475

puestos de trabajo directos e indirectos, lo que representa un 87% de la población activa. Además, el impacto sobre la producción supone un 65% del PIB del municipio. En la Tabla 6.4 presentamos de una forma más detallada dichos resultados.

**Tabla 6.4** Resultados multiplicador Keynesiano local. Candiota

Población Candiota (nº pers) <sup>(a)</sup>	Población empleada <sup>(a)</sup> (nº pers)	Impacto empleo		PIB total <sup>(a)</sup> (miles de R\$)	Producción total obtenida (Y <sub>f</sub> ) (miles de R\$)	Y <sub>f</sub> /PIB	M <sub>Y</sub> (**)	M <sub>D</sub> (**)
		nº pers	% sobre población empleada					
8.826	4.015	3.475	87%	246.858	161.463	0,65	1,31	1,30

(\*\*) M<sub>Y</sub> = Multiplicador producción / M<sub>D</sub> = Multiplicador renta

(a) Fuente: IBGE Ciudades: [www.ibge.gov.br/cidadesat](http://www.ibge.gov.br/cidadesat). Consulta realizada el 17 de mayo de 2012.

Fuente: Elaboración propia

Las aproximaciones realizadas a través del *multiplicador Keynesiano local* confirman las sospechas relacionadas con la importancia económica de la actividad (minería) para el municipio de Candiota. Observamos, en este sentido, cómo la inmensa mayoría de los puestos de trabajo tienen una estrecha relación con la actividad y cómo la producción impacta sobre el PIB del municipio. Otro aspecto relevante que hay que mencionar es que la producción (minería) de carbón realizada en la mina de Candiota se dedica casi en su totalidad a abastecer la termoeléctrica. La mina está a cargo de la *Companhia Rio Grandense de Mineração* (CRM), cuya producción anual en 2009 sumó 1.600.000 toneladas del recurso (CRM, 2009). Cabe resaltar que solo la termoeléctrica (Candiota) consumió en este mismo año la cantidad de 1.215.334 toneladas por año (véase Tabla 4.2), un 76% de la producción realizada por la minería. Esta evidencia trae a flote el hecho de que un supuesto cierre de la central o cambio del combustible empleado mermaría también la actividad que hoy se realiza en la minería del recurso.

Por último, conviene matizar que el método del *multiplicador Keynesiano local* es una forma aproximada y rápida para estudiar el impacto de una determinada actividad económica. Una valoración detallada de la realidad económica de la zona y sus efectos requeriría modelos más complejos así como un mayor detalle en los datos. No obstante, habida cuenta del objetivo planteado en esta tesis, un análisis aproximado serviría con creces para establecer alguna pauta de actuación para el planificador a la hora de plantear la mitigación de los impactos.

### 6.3. Las tecnologías limpias del carbón (CCT)

Los usos del carbón desde su extracción, transporte y empleo final pueden ser causantes de grandes impactos ambientales que van desde la erosión, producción de residuos altamente contaminantes, contaminación acústica, atmosférica y de recursos acuíferos hasta impactos sobre la biodiversidad local. El debate asociado con la utilización del carbón como recurso energético se centra fundamentalmente en los impactos ocurridos durante todas las fases de su ciclo. Tales impactos, la mayoría de las veces, superan a aquellos provenientes de otros recursos fósiles.

De cara a alcanzar el fin último que persigue este capítulo se planteará la viabilidad, bajo un punto de vista social, de algunos avances tecnológicos cuyo objetivo es mitigar los impactos socio-ambientales producidos por el carbón. Este análisis pretende alcanzar una aproximación con respecto a las alternativas que se podrían plantear a la hora de mantener la actividad económica de la región (minería), con el menor nivel de impacto posible. No obstante, con carácter previo, conviene hacer un repaso sobre algunos de los avances tecnológicos, centrándonos en las características de la central objeto de este estudio.

Como se ha podido comprobar en el capítulo dos, el carbón sigue teniendo un peso importante en la matriz energética mundial. Este insumo representa la mayor parte de las reservas probadas de recursos fósiles y su uso como recurso energético ha alcanzado una gran escala. Además, es el responsable de la mayor parte de la producción mundial de electricidad (41%)<sup>176</sup>. Por otro lado, pese a su relevancia como insumo energético, los impactos sociales y ambientales han obligado a centrar el debate sobre su uso de una forma sostenible.

El carbón es un insumo cuyos compuestos fundamentales son el carbono, hidrógeno, azufre y otras materias. Cuando se quema genera una serie de elementos nocivos para el medioambiente, infraestructuras y principalmente para la salud humana. Los principales elementos redundantes del proceso de combustión son el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas (ej. PM<sub>2,5</sub>), arsénico, ácido clorhídrico, mercurio, níquel y plomo. Además, durante el proceso libera carbono, que al combinarse con el oxígeno produce CO<sub>2</sub>, uno de los gases de efecto invernadero (GEI).

---

<sup>176</sup>Véase capítulo 3.

Tradicionalmente, la producción de electricidad a partir del carbón viene siendo realizada a través de sistemas de combustión a carbón pulverizado. Los emplazamientos más recientes que utilizan este tipo de combustión han llegado a alcanzar niveles de eficiencia de entre un 38-40% (Franco & Diaz, 2009), pero el principal constreñimiento sigue siendo los elevados niveles de emisión que presenta dicho esquema de combustión. Este supuesto *trade-off* entre la explotación energética del carbón y las externalidades que genera, trae a flote la necesidad de plantear, bajo un punto de vista social, la viabilidad de determinadas tecnologías que permitiesen minimizar dichos impactos. En el ámbito de la economía del carbón, dichas alternativas son conocidas como las Tecnologías Limpias del Carbón (CCT), cuya característica fundamental es visualizar soluciones para el aprovechamiento sostenible del recurso.

Las CCT están fundamentadas en dos objetivos principales. Por un lado, elevar el desempeño ambiental y, en paralelo, la eficiencia energética de las centrales. Al hablar de desempeño ambiental, dichas tecnologías abordan únicamente aquellas variables relacionadas con la reducción de las emisiones atmosféricas. Es conveniente matizar esta cuestión, ya que la minería y el transporte de carbón también son fuentes de afecciones, pero a día de hoy ambas son susceptibles de un control más efectivo que minimice sus impactos. De esta forma, con carácter general, las CCT que se plantean en esta investigación tienen por objetivo reducir las emisiones de partículas<sup>177</sup> (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10-2,5</sub>), óxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Cabe reiterar, por lo tanto, que esta investigación se centra en los impactos producidos por la generación de electricidad y no contempla aquellos derivados del ciclo de vida de la fuente.

No cabe duda de que las perspectivas de uso del carbón como recurso energético pasan inevitablemente por el alcance de la paridad de red de las CCT. La paridad de red redundaría en que los costes de implantación de las CCT alcanzasen precios competitivos en el mercado, permitiendo de esta manera su rápida expansión. Según Franco & Diaz (2009), en el ámbito de las CCT las dos tecnologías más prometedoras en términos ambientales y, evidentemente, las que disponen de una curva de aprendizaje más amplia son la Advanced Ultra-Supercritical Generation (USC, por sus siglas en inglés), la Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (IGCC<sup>178</sup>, por sus siglas en inglés) y la Externally Fired Combined Cycle (EFCC, por sus siglas en inglés). La primera es considerada el sistema más eficiente de

---

<sup>177</sup>Particulate Matter (PM): PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>.

<sup>178</sup>Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC).

producción de electricidad a partir de carbón pulverizado. Su mecanismo consiste en operar a gran presión y temperatura, hecho que aumenta la eficiencia de la turbina y reduce el consumo del combustible (carbón). El proceso asociado con las plantas IGCC consiste básicamente en transformar carbón en gas, cuyo flujo elimina gran parte de los residuos presentes en el carbón y, por ende, reduce los niveles de emisión. Por último, las centrales EFCC se caracterizan por utilizar una turbina de ciclo combinado de alta eficiencia para la quema del carbón. Evidentemente, estas tres tecnologías representan tres extremos en lo que se refiere no solo a la eficiencia productiva, sino también a la elevada inversión necesaria.

No conviene perder de vista que el tipo de CCT a ser aplicado dependerá del tipo de carbón empleado. De esta manera, el empleo de la tecnología dependerá más bien de las características morfológicas del carbón encontrado en el yacimiento de Candiota. Además, las CCT implican tres niveles de actuación. Por un lado, existen aquellas medidas dirigidas a reducir o controlar las emisiones de contaminantes, principalmente el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y las partículas, sin que se produzcan cambios estructurales en el esquema de la central. En este nivel podríamos citar como ejemplo los filtros de aire para control de partículas, los mecanismos de reducción de óxidos de nitrógeno y azufre, etc. El segundo nivel lo forman aquellas tecnologías que supondrían cambios estructurales en los ciclos de combustión. Como ejemplo podríamos citar los sistemas de combustión a lecho fluidizado, o las centrales EFCC e IGCC. Por último, la otra etapa asociada con las CCT consiste en introducir procesos de captura y secuestro del  $\text{CO}_2$ .

A continuación, presentaremos las principales tecnologías asociadas con las tres etapas de las CCT mencionadas en el párrafo anterior.

#### 6.3.1. *Tecnologías relacionadas con la reducción y control de los contaminantes*

Tal y como se ha mencionado anteriormente, este grupo de medidas asociadas con las CCT procura reducir los impactos a lo largo del ciclo de combustión del carbón. Dichas medidas actúan antes, durante o después del proceso de producción. Con carácter previo a la quema, pueden tratar el carbón reduciendo la presencia de elementos (ej. azufre o nitrógeno) que, durante el proceso de combustión, podrían combinarse con otros como el oxígeno y crear los elementos contaminantes ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ). Durante la combustión, también se pueden introducir medidas correctoras que



de alguna manera impidan la formación de los contaminantes. Al final del proceso, también existen mecanismos que, al ser introducidos, por ejemplo, en la chimenea, ayudan a colectar parte de los contaminantes impidiendo que sean liberados a la atmósfera.

Conviene volver a señalar que todos estos procesos no suponen grandes cambios en la estructura de la central. Se trataría más bien de alteraciones que convivirían perfectamente con un sistema de combustión a carbón pulverizado. A continuación, expondremos algunas de las principales medidas tecnológicas asociadas con este tipo de intervención.

#### 6.3.1.1. *El Coal Cleaning*

La tecnología del Coal Cleaning (CC, en adelante), también conocida como *Coal Beneficiation* o *Coal Preparation*, consiste en tratar el carbón de forma que incremente su poder calorífico y reduzca los grados de azufre y minerales. Se trata de un procedimiento previo a la utilización del recurso, cuyos resultados son básicamente la reducción de los residuos generados tras el proceso de combustión.

El CC es particularmente relevante en casos de escenarios que requieren el transporte del carbón desde su punto de extracción hasta las zonas donde serán definitivamente consumidos. Esto ocurre en función de que, además del valor ambiental que aporta al proceso de combustión, la reducción del peso genera ahorros logísticos. Así, el tratamiento del carbón y su consecuente aplicación en termoeléctricas, además de elevar la eficiencia de la central, reducen las emisiones de contaminantes.

Cabe mencionar que en el caso del yacimiento de Candiota, esta tecnología no parece ser tan viable. Tal hecho deriva de la propia composición del carbón encontrado en el yacimiento de Candiota, cuyas características parecen apuntar a que el tratamiento no fuese viable dado que, como se ha mencionado en el capítulo uno, su poder calorífico es muy bajo. Además, conviene resaltar que la mayor parte de las actividades que dependen del carbón como insumo energético están localizadas muy próximas al recurso, limitando la ventaja que produce esta tecnología en materia de transporte. Además, la Empresa Brasileña de Investigaciones Energéticas (EPE, 2006) señala que resultaría antieconómico un eventual tratamiento del carbón de Candiota debido fundamentalmente a sus propiedades morfológicas.

### 6.3.1.2. *Sistemas Flue Gas Desulphurisation (FGD), Selective Catalytic Reduction (SCR) y Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)*

El azufre es uno de los elementos fundamentales presentes en el carbón. Más de un 90% del azufre al ser introducido en el proceso de combustión produce SO<sub>2</sub>, que es un gas ácido cuyos efectos sobre la salud humana, infraestructuras, agricultura y ecosistemas son más bien elevados. Tal y como mencionamos en el apartado anterior, el azufre también puede ser removido antes de la combustión (*coal cleaning*). Durante el proceso de combustión también es posible evitar la formación de SO<sub>2</sub> mediante la utilización de disolventes alcalinos.

Las tecnologías mencionadas en este apartado son sistemas de control y reducción *ex post*, que buscan eliminar/colectar los contaminantes después de que hayan sido formados durante el proceso de combustión. Los sistemas de desulfurización (FGD, en adelante) tienen por objetivo reducir el gradiente de emisiones de dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) producidas durante el proceso de combustión. Su actuación consiste en la instalación de mecanismos depuradores capaces de remover la mayoría del SO<sub>2</sub> emitido. Franco & Diaz (2009) destacan que los sistemas FGD pueden llegar a contener un 95% del SO<sub>2</sub>. Según datos del World Coal Institute (WCI, 2005), en Estados Unidos las emisiones de SO<sub>2</sub> han sufrido una reducción de un 61% entre 1980 y 2000, gracias a la aplicación de los sistemas o filtros de desulfurización. El sistema FGD, ampliamente utilizado en el mercado para el control de las emisiones de SO<sub>2</sub>, está formado por los llamados *wet scrubbers*. Por lo general, los *wet scrubbers* aplican una mezcla de disolventes basados en calcio, sodio y amoníaco que son puestos para reaccionar<sup>179</sup> con el SO<sub>2</sub> generado durante el proceso de combustión. Algunos tipos de *wet scrubbers* pueden llegar a alcanzar eficiencias de remoción de SO<sub>2</sub> de hasta un 99%.

Los sistemas SNCR apuestan por reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). El mecanismo básico de estos sistemas es inyectar un reactivo (amoníaco o urea) en la caldera a una temperatura apropiada. Conviene mencionar que la formación de NO<sub>x</sub> dependerá en mayor medida del tipo de combustible empleado y del proceso de combustión. La Agencia Internacional de la Energía (IEA)<sup>180</sup> estima que los sistemas SNCR reducirían las emisiones de NO<sub>x</sub> entre un 30 y un 40%. En el caso de

---

<sup>179</sup> La reacción química que se produce es la siguiente:  $\text{SO}_2 + \text{CaCO}_3 = \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$  (Fuente: International Energy Agency (IEA): Disponible en: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (consulta realizada el 02 de marzo de 2012).

<sup>180</sup> International Energy Agency (IEA): Disponible en: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (consulta realizada el 02 de marzo de 2012).

los sistemas SCR, se inyecta vapor de amoníaco en el flujo de gas pasando por un catalizador. Las reducciones esperadas de las emisiones de NO<sub>x</sub> pueden llegar a ser de entre 80-90%<sup>181</sup>.

#### 6.3.1.3. *Filtros de Aire Electroestático (ESP)*

El objetivo fundamental de los Filtros de Aire Electroestático o Electrostatic Precipitators (ESP, en adelante) es reducir las emisiones de partículas (PM). La quema de combustibles sólidos como el carbón genera una gran cantidad de cenizas y partículas y, por ende, su nivel de emisión dependerá fundamentalmente del tipo de carbón empleado, configuración de la caldera (*boiler*), operación de la central y de la existencia de mecanismos de control *ex post*. Es justamente bajo el enfoque de sistemas de control postcombustión que se enmarcan los ESP. El esquema de estos filtros redonda en hacer pasar el flujo de gas por unas placas colectoras que a su vez disponen de un campo eléctrico que hace que las partículas sean atraídas hacia las placas. El principal problema de esta tecnología es la acumulación de material en las placas, lo que obliga a realizar mantenimientos periódicos. Franco & Diaz (2009) señalan que los ESP pueden llegar a reducir los niveles de emisión de partículas en un 99%.

#### 6.3.2. *Tecnologías que supondrían cambios estructurales en los ciclos de combustión*

Las tecnologías que se van a describir comparten la característica fundamental de que su implementación supondría cambiar el sistema de combustión de la central, o bien alterar significativamente la composición actual. Entre las muchas alternativas existentes, hemos resumido las más frecuentes que, con carácter general, podrían resultar eficientes a medio-largo plazo.

##### 6.3.2.1. *Ultra-supercritical power plants (USC)*

En los apartados anteriores se ha planteado una CCT que, sin comprometer demasiado la estructura de la central, ofrece medidas mitigadoras antes, durante o después del proceso de combustión. Las centrales *Ultra-Supercritical* (USC) representan la evolución de los sistemas de combustión a carbón pulverizado. Dicha tecnología incorpora una nueva configuración de la forma de combustión en la caldera e introduce otros elementos que mejoran no solo la eficiencia de la central, sino que también reducen la emisión de contaminantes.

---

<sup>181</sup> International Energy Agency (IEA): Disponible en: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (consulta realizada el 02 de marzo de 2012).

De esta manera, este tipo de tecnología supone cambios considerables en la estructura de la central y, por ende, en el sistema de combustión. El principal objetivo de las centrales USC es alcanzar patrones operativos de control ante un aumento de la presión y temperatura. Dichas centrales suelen alcanzar eficiencias térmicas de entre 45-47%.

Pese a que las centrales USC son relativamente conocidas, actualmente se están desarrollando investigaciones en sistemas USC avanzados, cuyos resultados han elevado la eficiencia hasta un 50%.

#### 6.3.2.2. *Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (IGCC) y la Externally Fired Combined Cycle (EFCC)*

Al igual que en el apartado anterior, las tecnologías que serán abordadas en este apartado responden a un cambio en los sistemas de combustión. Las centrales basadas en la Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (IGCC, en adelante) se caracterizan fundamentalmente por transformar el carbón en gas, sobre todo en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). En este sentido, una vez que se haya completado el proceso de conversión de carbón a gas, el azufre, partículas, cenizas y otros contaminantes pueden ser más fácilmente removidos. Se trata sin lugar a dudas de la tecnología más eficiente en términos ambientales. De esta forma, solo el gas alimenta la turbina para la producción de electricidad. Quizás el único inconveniente de este tipo de tecnología es el coste asociado (inversión). Se estima que dichas centrales IGCC a carbón tienen un coste aproximadamente de un 40% superior con relación a plantas con sistemas de combustión a carbón pulverizado y, por eso, todavía no han alcanzado una escala comercial.

La Externally Fired Combined Cycle (EFCC, en adelante) podría ser considerada como el futuro de la generación de energía a través de carbón. Su funcionamiento implica utilizar turbinas de gas de alta eficiencia en ciclo combinado en la generación de energía eléctrica a través del carbón.

### 6.3.2.3. Combustión en Lecho Fluidizado (*Fluidised Bed Combustion*) – FBC

El proceso de fluidización es relativamente antiguo. Su utilización a escala comercial empezó a partir de los años 40, como parte del proceso de transformación del petróleo bruto en gasolina. En los años 70, el proceso también pasó a ser utilizado en la síntesis del polietileno.

Hoy en día, uno de los usos más innovadores del proceso de fluidización es la combustión en lecho fluidizado (FBC<sup>182</sup>, en adelante), cuyo ámbito de aplicación alcanza la generación termoeléctrica a carbón. Los principales logros del FBC son la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>.

Además, el FBC puede incorporar un proceso de “secuestro”<sup>183</sup> de carbono. Para ello, utiliza un óxido básico<sup>184</sup> como elemento absorbente del oxígeno durante el proceso de combustión, produciendo partículas sólidas de metal y una mezcla de dióxido de carbono y vapor de agua. Al condensarse el agua queda solamente el CO<sub>2</sub>, que podría ser “secuestrado”. Las partículas de metal son transportadas por otro lecho fluidizado donde reaccionan con el oxígeno produciendo calor y un óxido que a su vez podrá ser reutilizado en el proceso de combustión.

Lo más importante que se debe conocer con respecto al proceso FBC, es su aplicación en el proceso de quema del carbón. El mecanismo de combustión utilizado en esta técnica consiste en quemar el carbón inyectado en un lecho de partículas suspendidas por un flujo de aire. El aire que circula por el lecho se calienta hasta la temperatura de ignición del combustible, que empieza a quemarse. Así, la mayor parte de las partículas sólidas se quedan “atrapadas” en el lecho, evitando su emisión a la atmósfera. Las partículas recogidas son susceptibles de ser recolectadas a través de equipos especializados. El calor generado durante el proceso de combustión también puede ser “captado” y utilizado en el precalentamiento del aire de combustión.

La combustión en lecho fluidizado ha evolucionado con el tiempo y, además del formato tradicional mencionado arriba, actualmente dispone de otras dos tipologías más eficientes bajo un punto de vista ambiental:

---

<sup>182</sup> *Fluidized Bed Combustion*, en inglés.

<sup>183</sup> El proceso de secuestro del carbón consiste en captar el CO<sub>2</sub> resultante de un proceso de combustión para enseguida almacenarlo bajo diversas alternativas, evitando así su emisión a la atmósfera.

<sup>184</sup> Un óxido básico es un compuesto binario formado por un metal y un oxígeno.

- *Circulating Bed Fluidized Bed Combustion (CFBC): las partículas circulan entre la caldera de combustión e intercambiadores de calor para que se enfríen y enseguida vuelvan a la cámara para mezclarse, de nuevo, con el carbón.*
- *Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC): supone inyectar el aire a presión en la caldera de combustión.*

Además, en la Tabla 6.6 se muestran los niveles de eficiencia térmica y ambiental de los tres tipos tradicionales de combustión en lecho fluidizado.

#### **6.4. Selección de las alternativas tecnológicas**

En este apartado se plantean las distintas alternativas tecnológicas dirigidas a la mitigación del impacto generado por la central termoeléctrica de Candiota. Para ello, se proponen cuatro alternativas: (a) introducción de sistemas de combustión a lecho fluidizado (atmosférico; AFBC y presurizado; PFBC); (b) introducción de sistemas de control de emisiones de partículas (PM), SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (sistemas ESP, FGD, y SCR, respectivamente); (c) cambio tecnológico introduciendo una planta IGCC y (d) conversión de la central a gas natural (*repowering*). Conviene resaltar que la elección de la tecnología y/o la nueva configuración de la central atienden a un solo objetivo: ofrecer una información adicional al planificador acerca de cuáles de los lineamientos planteados podría ser el más eficiente en términos sociales. Cuando nos referimos a este objetivo queremos decir que la elección de la tecnología o tipo de central asume un carácter más bien pragmático, cuya intención es valorar las distintas alternativas, su correspondiente inversión y, en su caso, los efectos que tendría sobre la economía de la zona. En este sentido, por un lado, vislumbramos tres vías de solución al problema (lecho fluidizado, sistemas de control e IGCC) que pasan por mantener la explotación del carbón, sin mermar en este sentido gran parte de la economía de la zona (minería). La otra vía planteada, conversión a gas natural, difiere de las anteriores por el hecho de que no utilizaría el carbón como insumo y, por ello, resultaría en un impacto sobre la economía de la zona (minería).

También es importante manifestar que el objetivo de esta investigación no es plantear aquella alternativa que bajo un punto de vista técnico y comercial se ajuste a la perfección a la realidad del caso de estudio. Esto quiere decir que el enfoque no es estudiar, con un elevado grado de detalle, aquellos requisitos técnicos que mejor se adapten al caso de la central de Candiota ni tampoco definir rigurosamente los costes

de inversión asociados con cada una de ellas, sino elegir, en términos generales y según la literatura especializada, aquel emplazamiento o tecnología que ofrezca la mejor solución aproximada al problema en cuestión. Para ello, tras una exhaustiva revisión de la literatura pertinente, se han elegido aquellas alternativas disponibles en el mercado que, bajo el punto de vista de la realidad del caso de estudio, fuesen capaces de brindar aceptables niveles de eficiencia ambiental y equilibrio con la realidad del caso planteado en esta tesis.

En la Tabla 6.5 presentamos los resultados de este apartado. Es decir, los costes privados asociados con cada tecnología, así como los beneficios sociales que redundarían de su introducción. En los apartados que siguen, desarrollaremos los procedimientos de cálculo y demás aspectos relacionados con dichos resultados.

**Tabla 6.5** Costes de adaptación de la central de Candiota – CCT y gas natural

*(Continúa en la página siguiente)*

Tipo de tecnología	Inversión (US\$ / kW) 2009	Capacidad instalada (kW)	Coste de inversión total (millones US\$)	Factor de capacidad (%) <sup>(b)</sup>	Vida útil (años)	Costes variables de O&M <i>Observación: Gas natural incluye fijos y variables</i>		Costes fijos de O&M	
						Coste unitario (US\$/MWh) 2009	Valor presente neto (millones de US\$)	Coste unitario (US\$/KW año) 2009	Valor presente neto (millones de US\$)
AFBC Repowering	800 – 1.200	446.000	357 – 535	34%	30	7,7 (a)	103 (c)	34 (a)	154 (d)
PFBC Repowering	900 – 1.500		401 – 669			7,7 (a)	103 (c)	34 (a)	154 (d)
PCC - ESP+SCR+FGD	150 - 250		67 -112			7,7 (a)	103 (c)	34 (a)	154 (d)
IGCC	1.200 – 2.000		535 - 892			5,0 (a)	62 (c)	43 (a)	195 (d)
Gas Natural	450 - 750		201 - 335			3,3 (k)	44 (c)	-	-

(a) **Nota:** Para calcular la inversión total se tuvo en cuenta la capacidad instalada de la central: 446.000 kW.

(b) Los valores de los costes fijos y variables (AFBC, PFBC y PCC-ESP/SCR/FGD) siguen la recomendación de la Empresa Brasileña de Investigación Energética (EPE, 2006; tabla 11, p.79). Se trata de valores medios calculados por la EPE a partir de diversos estudios publicados a nivel mundial. Los valores originales (costes fijos: US\$ 28,00/kW.año y costes variables: US\$ 6,4/MWh) corresponden al año 2005 y por eso fueron actualizados a 2009 teniendo en cuenta una tasa de descuento de un 4,7% (inflación promedio para el periodo; Brasil. Banco Central do Brasil: <http://www.bc.gov.br/> . Consulta realizada el 18 de mayo de 2012). Los costes fijos y variables del IGCC también han sido estimados por la EPE y siguen el mismo procedimiento de actualización a precios de 2009. Los valores originales (2005) de los costes fijos y variables (IGCC) son: US\$ 4,2/MWh y US\$ 36,00/kW.año).

(c) Valor promedio de los factores de capacidad de central entre 2001 a 2009 (CGTEE, 2009).

(d) El Valor presente neto se calculó teniendo en cuenta los costes variables anuales; US\$ 10 millones (capacidad instalada total; 446MW x 8.760 horas/año x factor de capacidad; 34% x coste variable unitario; US\$7,7/MWh), una tasa de descuento de un 9% (coste de oportunidad del capital que es la tasa de interés en Brasil; SELIC; [www.bc.gov.br](http://www.bc.gov.br/) . Consulta realizada el 18 de mayo de 2012) y la vida útil de 30 años (EPE, 2006). Para el IGCC y gas natural, los costes anuales son de US\$ 7 y US\$4,3 millones respectivamente y el cálculo del valor presente neto siguió el mismo procedimiento mencionado para las otras tecnologías.

(e) El Valor presente neto (AFBC, PFBC y PCC-ESP/SCR/FGD) se calculó teniendo en cuenta los costes fijos por año; US\$15 millones (capacidad instalada total; 446.000 KW x coste fijo unitario; US\$ 34/KW.año), una tasa de descuento de un 9% (coste de oportunidad del capital, que es la tasa de interés en Brasil; SELIC; [www.bc.gov.br](http://www.bc.gov.br/) . Consulta realizada el 18 de mayo de 2012) y la vida útil de 30 años (EPE, 2006). Para el IGCC, el coste anual es de US\$ 19 millones y el cálculo del valor presente neto siguió el mismo procedimiento mencionado para las otras tecnologías.

(f) Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la EPRI<sup>185</sup> y EPE (2006)

<sup>185</sup>EPRI.Repowering Existing Fossil Steam Plants, developed by William C. Stenzel, Dale M. Sopocy & Stanley E. Pace. Disponible en: [http://soapp.epri.com/papers/Repowering\\_Fossil\\_Plants.pdf](http://soapp.epri.com/papers/Repowering_Fossil_Plants.pdf) (consulta realizada el 13 de marzo de 2012).



(continuación)

Coste del Combustible (carbón y gas natural)					Coste total (inversión + O&M + combustible) (millones de US\$) Valor presente neto		Beneficio social <sup>(i)</sup> (costes externos caso estudio – costes externos tecnologías) Millones de US\$				
Eficiencia térmica (%)	Consumo Carbón: ton/año <sup>(f)</sup> Gas: MMBTU/año	Precio carbón (US\$/t) 2009 <sup>(g)</sup> Gas natural (US\$/MMBTU)	Coste Total combustible/año (millones US\$)	Valor presente neto <sup>(h)</sup> (millones de US\$)	Límite inferior	Límite superior	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Beneficio Total
34% <sup>(e)</sup>	1.049.812	21	22	228	842	1.020	6,6	39,5	8,1	38,5	92,8
42% <sup>(e)</sup>	849.848		18	185	843	1.110	7,1	41,8	8,9	48,7	106,6
20% <sup>(e)</sup>	1.792.478		38	389	713	758	5,4	33,9	6,7	0 <sup>(l)</sup>	46,0
45% <sup>(e)</sup>	793.192		17	172	964	1.321	7,7	42,1	11,0	51,7	112,5
50% <sup>(e)</sup>	9.065.149	3,2 <sup>(l)</sup>	29	483	728	862	7,7	42,3	8,6	43,7	102,3

(g) Las eficiencias térmicas de las centrales con AFBC, PFBC, IGCC y gas natural (ciclo combinado) fueron estimadas por la EPE (EPE, 2006) entre 34-37%, 42-45%, 45-48% y 50%, respectivamente. Se adoptaron de esta manera los límites inferiores: 34%, 42%, 45% y 50%, respectivamente. La eficiencia térmica de la tecnología PCC-ESP/SCR/FGD tuvo en cuenta el valor que presenta la central en su configuración actual, puesto que la introducción de estos sistemas no cambiaría el sistema de combustión (pulverizado).

(h) El consumo del carbón se calculó teniendo en cuenta la eficiencia térmica (*n*) que es la relación entre la energía útil y la energía suministrada 
$$n (\%) = \frac{\text{energía útil}}{\text{energía suministrada}}$$
. Para ello, se calcula la **energía suministrada**: Capacidad instalada (446.000kW) x 8.760 (horas/año) x factor de capacidad (34%) x 859,85 (convierte kWh en kcal; 1 kWh = 859,85 kcal). Una vez conocida la energía total suministrada aplicamos la eficiencia térmica asociada con cada tecnología (%) y encontramos la energía útil en kcal. Por último, para disponer del consumo en toneladas, dividimos la energía útil en kcal por el poder calorífico del carbón de Candiota; 3.200 kcal/kg (EPE, 2006).

(i) Precio del carbón estimado para el yacimiento de Candiota, (EPE, 2006): R\$ 40,63/tonelada (reales brasileños a precios del 2005). Para actualizar dicho valor a 2009 se tuvo en cuenta una tasa de descuento de un 1% (evolución precios carbón; índice de precios 2005 a 2009; Instituto Brasileño de Investigación Económica Aplicada (IPEA): [www.ipea.gov.br](http://www.ipea.gov.br) consulta realizada el 18 de mayo de 2012). Para convertir a dólares se tuvo en cuenta un tipo de cambio de 1US\$ = R\$2,00. (Banco Central do Brasil: [www.bc.gov.br](http://www.bc.gov.br) . Consulta realizada el 18 de mayo de 2012).

(j) El Valor presente neto se calculó teniendo en cuenta una tasa de descuento de un 9% (coste de oportunidad del capital que es la tasa de interés en Brasil; SELIC; [www.bc.gov.br](http://www.bc.gov.br) . Consulta realizada el 18 de mayo de 2012) y la vida útil de 30 años (EPE, 2006).

(k) El beneficio se calculó teniendo en cuenta los costes externos que generarían cada una de las tecnologías (CCT) menos el coste externo que genera la planta en su configuración actual y según un factor de capacidad de un 34% (los costes externos estimados en el caso de estudio tuvieron en cuenta un factor de capacidad de un 23% presentado por la central en 2009). Los costes externos de cada tecnología fueron calculados en función de los porcentajes de reducción de emisiones de cada una.

(l) Teniendo en cuenta que la introducción de estos sistemas (PCC-ESP, FGD y SCR) no cambiaría la configuración actual de la central, se estima que no habrá cambios en las emisiones de CO<sub>2</sub> y por ende el beneficio social sería nulo.

(m) Costes fijos y variables estimados por a EPE (EPE,2006) entre US\$2,5-4,0/MWh. Se adoptó el valor medio de US\$ 3,2/MWh.

(n) Valor original US\$ 2,581/MMBTU (ANP, 2002). Este valor ha sido actualizado a lo largo del periodo estudiado (30 años) , teniendo en cuenta el promedio de la inflación estadounidense durante el periodo 2001 a 2009; 2,4% (CPI;Consumer Price Index): <http://www.bls.gov/cpi/#tables> . (consulta realizada el 20 de mayo de 2012)

Puede que el decisor público, a la hora de abordar el problema, demande estudios de viabilidad más complejos con respecto a las alternativas tecnológicas, o bien se decante por una determinada vía que no haya sido contemplada en este análisis. Reiteramos en este sentido que este estudio no busca indicar de una forma unívoca el procedimiento técnico que se debería realizar, sino demostrar la potencialidad de las CCT u otras opciones para abordar el problema en cuestión, apuntando hacia la viabilidad de reducir el impacto sobre la salud sin mermar la economía de la zona.

**Tabla 6.6** Características de algunas CCT: emisiones evitadas

Tecnología	Estado actual de la tecnología	Eficiencia conversión (%)	Emisiones evitadas (%)			Estimativa emisiones (%) evitadas para Candiota, según tecnología elegida		
			PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Combustión en lecho fluidizado <sup>(1)</sup>								
AFBC <sup>186</sup>	Comercial	34-37%	80-90% <sup>(2)</sup>	90-95	60%	80%	90%	60%
CFBC <sup>187</sup>	Comercial	37-39%	80-90%	90-95	60%	N/A	N/A	N/A
PFBC <sup>188</sup>	Demostrado	42-45%	90-100%	98-99	70%	90%	98%	70%
IGCC <sup>189</sup>	Demostrado	45-48%	100%	99%	98-99	100%	99%	98%
IGFC <sup>190</sup>	I+D	40-60%	100%	85-95	92	N/A	N/A	N/A

(1) La combustión en lecho fluidizado contribuye enormemente a la reducción del SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. En todo caso, se asume que la central incorpora filtros de aire electrostáticos.

(2) Según las estimativas realizadas por la Empresa Brasileña de Investigación Energética (EPE, 2006, p. 132) los niveles de emisión de PM<sub>10</sub> de centrales a lecho fluidizado y a ciclo combinado podrían ser considerados despreciables.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NEEDS (2008) y WCI (2005)

En función de las características de la central y del tipo de carbón empleado, la combinación de distintas CCT debería generar niveles de reducción de emisiones superiores a un 90% para el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>. Observamos en esta línea cómo los niveles de emisión de algunas CCT (véase

Tabla 6.6 ) demuestran potenciales de reducción considerables. Cabe resaltar que, para las tecnologías elegidas para el estudio de su introducción en la central de Candiota, los porcentajes de reducción asumen una postura conservadora puesto se

<sup>186</sup> Atmospheric Pressure Fluidized Bed Combustion (FBC).

<sup>187</sup> Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)

<sup>188</sup> Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)

<sup>189</sup> Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (IGCC)

<sup>190</sup> Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle (IGFC).

han considerado los límites inferiores (véase Tabla 6.6 ). Además, en la Tabla 6.7 podemos observar algunos casos de centrales que, tras la implementación de tecnologías limpias, han logrado considerables porcentajes de reducción de emisiones.

**Tabla 6.7** Ejemplos de centrales que aplicaron CCT y los niveles de eficiencia logrados.

Central	Tecnología empleada	Potencia (MW)	Reducciones verificadas de SO <sub>x</sub>	Reducciones verificadas de NO <sub>x</sub>	Reducciones verificadas de partículas
Osaki (Japón)	Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined-Cycle	250 MW	97,7%	88,3%	97,2%
Buggenum (Holanda) The Avedore	<p><i>Eficiencia térmica de un 36%.</i></p> <p><i>En plantas que aplican altas temperaturas la eficiencia alcanza 50-55%</i></p>	N/D	<p><b>50-70%</b></p> <p><i>Cuando se trata de una planta de gran tamaño, las reducciones pueden alcanzar hasta un 95%</i></p>	<p><b>60 – 70%</b></p> <p><i>Existen técnicas que permiten una reducción de hasta un 90%, pero a un coste muy elevado</i></p>	<p><b>80-90%</b></p> <p><i>Utilizando filtros de aire electrostáticos las reducciones pueden llegar hasta un 95%.</i></p>

Fuente: Elaboración propia

Antes de proceder al análisis de las distintas alternativas, conviene matizar que todas las alternativas aquí planteadas no están exentas de externalidades. Es decir, aunque se produjera una eventual adaptación/modificación, la configuración final seguiría generando alguna externalidad que dependería, obviamente, del tipo de tecnología empleada pero que, en cualquier caso, sería inferior al estado actual (costes externos) estimado para la central de Candiota.

#### 6.4.1. Alternativa A: Introducción de sistemas de combustión a lecho fluidizado (FBC)

Las principales centrales de generación que aplican el FBC son, mayoritariamente, aquellas que utilizan el carbón como insumo primario. Conviene resaltar que la mayoría de las termoeléctricas a carbón existentes en el mundo emplean el sistema de combustión a carbón pulverizado (PCC)<sup>191</sup>. Hecho similar ocurre con la central de Candiota, cuya tecnología también asume esta configuración.

<sup>191</sup>Pulverised Coal Combustion (PCC)

Dichos sistemas introducen el carbón molido en partículas finas<sup>192</sup> en la cámara, donde se produce su combustión. Es interesante resaltar que el carbón pulverizado puede ser considerado una tecnología limpia desde que incorpora modernos sistemas de control del NO<sub>x</sub>, de desulfurización de gases y de control de partículas.

La principal aportación del FBC es el potencial de reducción de las emisiones de PM, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> con relación a la tradicional forma pulverizada de quema del carbón (Franco & Diaz, 2009). Además, la gran ventaja de esta tecnología es su potencial de reducción de contaminantes (NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>) sin necesidad de incorporar mecanismos extras de desulfurización (FGD) y control del NO<sub>x</sub> (SCR).

La EPE<sup>193</sup> (EPE, 2006) ha estimado que la inversión necesaria para la construcción de una nueva planta a carbón (lecho fluidizado) redundaría en aproximadamente US\$ 1.450 a 1.700 por kW de potencia. A modo ilustrativo, la inversión realizada en la construcción de la Fase C de la termoeléctrica de Candiota, que incorpora una tecnología de carbón pulverizado junto con un sistema FGD, fue de aproximadamente US\$ 1.220 por kW de potencia. No obstante, conviene señalar que dichos costes están relacionados con la construcción de nuevas centrales. En el caso de Candiota se trataría más bien de una actualización, donde se haría necesario estimar los costes adicionales de cara a una futura adaptación. Los costes adicionales relacionados con la adaptación de centrales a carbón (*repowering*) no han sido ampliamente estudiados, puesto que hay pocos casos en el mundo que relaten experiencias concretas al respecto. Posiblemente, este hecho se da porque en la mayoría de los países la opción de introducir sistemas de control ha resultado más eficiente, bajo un punto de vista financiero, que cambiar el sistema de combustión de las termoeléctricas a carbón. Una de las fuentes de datos más relevantes en términos de adaptación de termoeléctricas a carbón es el programa desarrollado por el Electric Power Research Institute (EPRI)<sup>194</sup>, a través de la aplicación *State-of-the-Art Power Plant Repowering Products* (SOAPP-REPO)<sup>195</sup>. Esta herramienta permite estimar los costes adicionales asociados con la adaptación de centrales a carbón a partir de diferentes tecnologías. En la Tabla 6.8 se presentan los costes adicionales que redundarían de una eventual adaptación a lecho fluidizado. Como se puede observar, hay dos opciones de *repowering*: la combustión a lecho fluidizado atmosférica (AFBC)

<sup>192</sup> Las partículas tienen un tamaño de entre 75 y 300 micrones.

<sup>193</sup> Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Se trata de una organización estatal brasileña encargada de la investigación y desarrollo en materia de energía. Valores encontrados en Plano Nacional de Energia 2030, EPE, Brasília, 14 de junio de 2006.

<sup>194</sup> [www.epri.com](http://www.epri.com)

<sup>195</sup> <http://soapp.epri.com/soapp/productframeset.htm>

y presurizada (PFBC). Los costes de la inversión inicial han sido calculados con base en los valores calculados en el EPRI y según la capacidad instalada de la central (446MW). Conviene resaltar que hemos considerado que una eventual modificación de la central mantendría la potencia actual.

Los costes variables de operación y mantenimiento (O&M, en adelante) han sido estimados en US\$ 7,7 por MWh (EPE, 2006), teniendo en cuenta un factor de capacidad de un 34%. La elección de este factor de capacidad se justifica por el hecho de que las características del sector eléctrico brasileño (alta participación de la hidroelectricidad) hace que la mayoría de las térmicas sean “despachadas” con carácter complementario y solo alcancen su potencial máximo en años de baja hidrología (EPE, 2006). Por este motivo, hemos considerado el factor de capacidad de un 34% que es el promedio de los valores alcanzados por la central de Candiota entre 2001 y 2009.

Por su parte, los costes fijos de O&M son de US\$34 por kW (2009)<sup>196</sup> y su valor anual se calcula con base en la capacidad instalada de la central (446MW). Conviene resaltar que tanto los costes fijos como los variables de O&M representan una estimativa conservadora puesto que son valores medios relacionados con centrales con factores de capacidad más altos y que utilizan un combustible (carbón) con menor contenido en cenizas y azufre. En la Tabla 6.5 se detallan los procedimientos de cálculo de costes fijos y variables.

**Tabla 6.8** Coste total de la inversión (FBC) - 2009

Tipo de tecnología	Inversión (US\$ / kW) 2009	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)+(B)+(C)+(D)
		Coste de inversión total (millones US\$)	Costes variables de O&M (millones de US\$) Valor presente neto	Costes fijos de O&M (millones de US\$) Valor presente neto	Coste Total combustible /año (millones US\$) Valor presente neto	Coste total (millones US\$) Valor presente neto
<b>AFBC Repowering</b>	800 – 1.200	357 – 535	103	154	228	842 – 1.020
<b>PFBC Repowering</b>	900 – 1.500	401 – 669	103	154	185	843- 1.110

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la EPE (EPE, 2006).

<sup>196</sup> Valores originales (EPE, 2006): O&M variables=US\$ 6,4/MWh (2005) y O&M fijos (2005)=US\$28/kW. Los valores han sido actualizados según procedimiento mencionado en la Tabla 6.5.

Los costes relacionados con el consumo de combustible tuvieron en cuenta principalmente la eficiencia térmica de cada una de las tecnologías (véase Tabla 6.5 ) que han sido estimadas por la EPE (EPE, 2006). El precio de la tonelada de carbón (US\$ 21,00/t) también ha sido estimado por el mismo organismo (EPE, 2006) y se refiere exclusivamente al carbón de Candiota. Los procedimientos de cálculo del consumo de carbón se detallan en la Tabla 6.5 .

El cálculo del valor presente neto de todos estos flujos se consideró una vida útil de la central de 30 años y una tasa de descuento de un 9%. Esta última tasa corresponde al tipo de interés básico de Brasil (tasa SELIC)<sup>197</sup>. De esta forma, los costes totales asociados con la inversión y operación son el resultado de la suma de las columnas A, B, C y D de la Tabla 6.8

El último aspecto que se requiere para analizar las distintas tecnologías son los costes externos que impondrían cada una de ellas. Para ello, se estimó el porcentaje de emisiones que serían evitadas por cada una de ellas y que han sido expuestas en la Tabla 6.6. Tal y como se mencionó anteriormente, con el objetivo de realizar una estimación conservadora de los costes externos, se optó por los límites inferiores de los porcentajes de emisiones evitadas. A continuación, se aplican los correspondientes porcentajes sobre las emisiones totales de PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> determinando de esta manera las eventuales emisiones que generarían cada una de las tecnologías planteadas. Después, multiplicamos las emisiones por los costes por kilogramo de contaminante que han sido estimados en este caso de estudio, alcanzando así los costes externos totales que generaría cada opción (véase Tabla 6.10 ). Los costes externos asociados con el CO<sub>2</sub> fueron estimados siguiendo el mismo procedimiento mencionado en el capítulo anterior, teniendo en cuenta el consumo de carbón calculado para cada opción tecnológica (véase Tabla 6.5 ).

Una vez que se hayan estimado los costes externos que redundarían de cada opción tecnológica, se calculan los beneficios sociales con respecto al estado actual de la central (configuración actual). Aquí hay que matizar que los costes externos estimados para el caso de estudio (escenario base) tuvieron en cuenta un factor de capacidad de un 23%, correspondiente a la producción de electricidad de la central en el año 2009. No obstante, la estimativa de los costes externos de cada tecnología tuvo en cuenta el promedio histórico; 34% (2001-2009) del referido factor de capacidad. De

---

<sup>197</sup> Coste de oportunidad del capital que es la tasa de interés en Brasil; SELIC; [www.bc.gov.br](http://www.bc.gov.br) . (Consulta realizada el 18 de mayo de 2012)

esta forma, hemos estimado los costes externos que redundarían de la configuración actual en el caso de que el factor de capacidad alcanzase un 34%. Tras haber calculado el monto de los costes externos de la configuración actual a un factor de capacidad de un 34%, restamos los costes externos de cada tecnología, obteniendo de esta manera el beneficio social del cambio (véase Tabla 6.10 ). Además, dichos beneficios deben ser descontados a valor presente neto. Este procedimiento se ejecutó teniendo en cuenta una tasa de descuento social de un 3% estimada para el caso de estudio<sup>198</sup> y un periodo de 30 años que corresponde a la vida útil de las tecnologías. Paralelamente, los costes unitarios (UC) no serán los mismos a lo largo del periodo estudiado. Dichos “costes futuros” sufrirán variaciones en función del poder adquisitivo (PPPGDP per cápita) de los países estudiados. No obstante, dichos cambios no se producen anualmente, sino que hemos considerado que el aumento efectivo de los costes unitarios ocurrirá a cada cinco años<sup>199</sup>. En la Tabla 6.9 ofrecemos un ejemplo de como se han calculado los beneficios sociales asociados con cada tecnología. El valor que figura en la columna D de la Tabla 6.9 (correspondiente al periodo 2014-2018) se va actualizando (5%) por cada período quinquenal hasta llegar al final del periodo. Este procedimiento se repite para todas las tecnologías y contaminantes. Los resultados de los beneficios sociales descontados pueden ser encontrados en la Tabla 6.5 .

**Tabla 6.9** Ejemplo de cálculo de los beneficios sociales (PM<sub>10</sub>)

	A	B	(A-B)	C	D D=C x (1+5%) <sup>1</sup>
Coste externo escenario base (2009) Candiota; Fc 23% kUS\$ (2009) PM <sub>10</sub>	Coste externo escenario base (2009) Candiota; Fc 34% kUS\$ (2009) PM <sub>10</sub>	Coste externo (2009) AFBC kUS\$ (2009) PM <sub>10</sub>	Beneficio social AFBC kUS\$ (2009) PM <sub>10</sub>	Coste externo 2009 a 2013 kUS\$ PM <sub>10</sub>	Coste externo 2014 a 2018 kUS\$ (2009) PM <sub>10</sub>
5.175	7.660	1.035	6.625	6.625	6.956

Fuente: Elaboración propia

<sup>198</sup> Nota del Director, Dr. Diego Azqueta: La tasa de descuento para el caso de estudio se fundamenta en la siguiente relación:  $i = z + n \times g$  .

$i$  es la tasa social de descuento que se pretende estimar;  $z$  es la tasa de preferencia temporal pura;  $n$  es elasticidad de la utilidad marginal de consumo y  $g$  es la tasa de crecimiento del PIB per cápita (3%; véase capítulo 4). Para el caso de estudio se consideró:  $z = 0$ ;  $n = 1,0$ ;  $g = 3\%$ .

<sup>199</sup> Nota del Codirector, Dr. Joseph V. Spadaro: A partir del beneficio estimado para el año base (2009) se han ido actualizando los valores por cada período de cinco años, teniendo en cuenta la tasa de un 5% que es el promedio de la variación del PPPGDP per cápita de los países incluidos en el dominio del impacto.(Fuente: FMI. World Economic Outlook Database 2012. Indicador PPPGDP per cápita; Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay. Consulta realizada en 26 de mayo de 2012).  
<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2012/01/weodata/index.aspx>

Los valores de los costes totales para la introducción de cada tecnología (costes de capital + costes de O&M + costes del combustible) y los beneficios sociales a fecha del 2009 están expuestos en la Tabla 6.10

**Tabla 6.10** Beneficio social según la tecnología empleada - FBC

Tipo FBC	Emisiones evitadas				Costes externos - CCT (millones de US\$ 2009)					Beneficio social				
	PM <sub>10</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Total	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Beneficio social (millones de US\$ 2009)
AFBC	80	90	60	14	1,03	2,9	3,0	53,9	60,9	6,6	39,5	8,15	38,5	92,8
PFBC	90	98	70	30	0,52	0,57	2,26	43,7	47,0	7,1	41,8	8,9	48,5	106,6

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4.2. *Alternativa B: Introducción de sistemas de control de emisiones de partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>: ESP, FGD y SCR.*

Como se ha señalado en los apartados anteriores, existen tecnologías disponibles en el mercado que, sin tener que modificar el sistema de combustión de la central, o bien producir demasiados cambios estructurales, son capaces de reducir con relativa eficiencia las emisiones de contaminantes. En los apartados anteriores se ha mencionado la eficiencia ambiental de los sistemas de desulfurización de gases (FGD), los precipitadores electrostáticos (ESP) y los sistemas de reducción catalítica (SCR). En el caso de los FGD, algunos de los esquemas más modernos han logrado alcanzar reducciones de las emisiones de SO<sub>2</sub> de entre un 80-99% (Takahashi, 1998). En cuanto a los ESP, la literatura también ha reportado niveles de reducción de partículas superiores a un 90%<sup>200</sup>. Los sistemas SCR avanzados son capaces de ofrecer reducciones potenciales de entre un 80-90%<sup>201</sup> (véase Tabla 6.11 ).

<sup>200</sup>Fuente: International Energy Agency (IEA). Disponible en: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (consulta realizada el 14 de marzo de 2012).

<sup>201</sup>Fuente: International Energy Agency (IEA). Disponible en: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (consulta realizada el 14 de marzo de 2012).



**Tabla 6.11** Costes de capital y eficiencia ambiental de los sistemas ESP, FGD y SCR

Tecnología	% reducción SO <sub>2</sub>	% reducción NO <sub>x</sub>	% reducción PM	% reducción para Candiota	Coste inversión US\$/kW
ESP	-	-	80-99	70	40-50
FGD	80-99	-	-	80	70-120
SCR	-	80	-	60	40-80
					-

Fuente: Elaboración propia a partir de Takahashi (1998)

Es interesante observar que estos tres mecanismos operan a escala comercial y por este motivo los costes de implementación son relativamente reducidos. Takahashi (1998) ha estimado los costes privados para los FGD, ESP y SCR. A partir de las estimaciones realizadas por este último autor, se calculó la inversión total necesaria de cara a una futura adaptación de la central de Candiota (Fases A y B). En el caso de la central de Candiota, la EPE<sup>202</sup>, tras estudiar las tecnologías disponibles en el mercado, considera viable económicamente emplear dos tipos de configuración de la central en el caso de que se deseara reducir el impacto causado por las emisiones de contaminantes. La primera de ellas sería mantener el sistema de combustión actual (carbón pulverizado) e incorporar un mecanismo de desulfurización del gas de combustión (FGD). Cabe resaltar que esta alternativa se encuentra en fase de estudio, habida cuenta de que la Compañía Brasileña de Generación Térmica (CGTEE) pondrá en marcha el 05 de marzo de 2012 una licitación dirigida a la adquisición de un sistema FGD, así como un equipamiento para la reducción de partículas<sup>203</sup>.

**Tabla 6.12** Coste total de la inversión sistema PCC-ESP + FGD + SCR

Inversión US\$/kW	(A)  Inversión total (millones US\$)	(B)  Costes variables de O&M (millones de US\$) Valor presente neto	(C)  Costes fijos de O&M (millones de US\$) Valor presente neto	(D)  Coste Total combustible /año (millones US\$) Valor presente neto	(A)+(B)+(C)+(D)  Coste total (millones US\$) Valor presente neto
150 -250	67 - 112	103	154	389	713-758

**Nota (1):** Coste privado estimado para Candiota teniendo en cuenta la capacidad instalada de la central: 446.000 kW

**Nota (2):** Los costes de O&M son similares para las centrales a lecho fluidizado y carbón pulverizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Takahashi (1998)

<sup>202</sup> Empresa Brasileña de Investigaciones Energéticas (EPE, 2006)

<sup>203</sup> Para más información, consultar la página de la

CGTEE: <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=122> (consulta realizada el 02 de marzo de 2012).

De esta manera, tal y como se puede observar, la introducción de los tres sistemas mencionados supondría una inversión de entre 67 y 112 millones de dólares por año. Los costes variables y fijos de O&M asumen los mismos valores de los FBC. El cálculo del consumo total de combustible sigue el mismo procedimiento mencionado en el apartado anterior y que además ha sido expuesto en la Tabla 6.5 . Por ende, el coste total (suma de las columnas A, B, C y D en la Tabla 6.12 ) a valor presente neto (vida útil de 30 años) se sitúa entre 713-758 millones de dólares (2009). En la Tabla 6.5 , explicamos con más detalle el método de cálculo de cada componente del coste total de la inversión.

Por último, cabe ahora estimar los costes externos de una eventual introducción de los sistemas ESP/FGD/SCR. Para ello, al igual que en el apartado anterior, se estiman los porcentajes de emisiones evitadas por estos sistemas (véase Tabla 6.13 ). Conviene aclarar que los valores originales han sido ajustados a la baja debido al hecho de que los mismos corresponden a centrales con un alto factor de capacidad, eficiencia térmica y cuyo carbón empleado tiene menos contenido en cenizas y azufre. El calculo del beneficio social tuvo en cuenta el mismo procedimiento aplicado en el apartado anterior (véase Tabla 6.5 ), cuyo monto total asciende a 46 millones de dólares.

**Tabla 6.13** Beneficio social según la tecnología empleada – PCC-ESP+FGD+SCR

Tipo Tecn.	Emisiones evitadas				Costes externos - CCT (millones de US\$ 2009)					Beneficio social (millones de US\$ 2009)				
	PM <sub>10</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Total	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Δ caso estudio; Beneficio social (millones de US\$ 2009)
PCC+ ESP FGD SCR	70 <sup>(c)</sup>	80 <sup>(a)</sup>	60 <sup>(b)</sup>	0	2,3	8,5	4,5	62,4	92,4	5,4	34,0	6,7	0	46,0

(a) Valor mínimo teniendo en cuenta la baja calidad del carbón de Candiota.

(b) Se aplicó una reducción (20 puntos porcentuales) sobre el valor propuesto por Takahashi (1998) debido a la baja calidad del carbón de Candiota.

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4.3. Alternativa C: Adaptación (repowering) a IGCC

En el apartado 6.3.2.2 se han reseñado las características técnicas de una planta de gasificación en ciclo combinado, así como las ventajas medioambientales que genera. Obviamente, al tratarse de una tecnología joven, todavía no ha alcanzado la paridad de red con respecto a otros emplazamientos y, por ello, la inversión inicial

necesaria es relativamente elevada<sup>204</sup>. Según datos estimados por la Comisión Parlamentaria de Ciencia y Tecnología del Reino Unido<sup>205</sup>, el coste estimado para una nueva planta de aproximadamente 500 MW, aplicando tecnologías IGCC, sería de 686 millones de dólares, con un coste unitario de implantación de US\$ 1.371 por KW instalado.

Takahashi (1998) también ha estimado los costes privados asociados con la construcción de una central IGCC, cuya inversión redundaría en aproximadamente 1.200 a 1400 dólares por kW de capacidad instalada. Además, este autor apunta que el coste podría bajar hasta alcanzar 850 dólares por kW en el caso de que aproximadamente otros diez emprendimientos adicionales fuesen construidos. Por otro lado, el EPRI<sup>206</sup> estima que la adaptación (*repowering*) de centrales convencionales a IGCC redundaría en un coste privado de aproximadamente 1.200 a 2.000 dólares por kW. Esta última estimativa nos parece más coherente puesto que abarca los costes adicionales vinculados con una eventual adaptación de la central (*repowering*). Así, en la Tabla 6.14 se puede observar la inversión final que se requeriría para introducir el esquema IGCC en la central de Candiota.

**Tabla 6.14** Costes totales para la adaptación de la central de Candiota a IGCC

	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)+(B)+(C)+(D)
Inversión US\$/kW	Inversión total (millones US\$)	Costes variables de O&M (millones de US\$) <i>Valor presente neto</i>	Costes fijos de O&M (millones de US\$) <i>Valor presente neto</i>	Coste Total combustible /año (millones US\$) <i>Valor presente neto</i>	Coste total (millones US\$) <i>Valor presente neto</i>
1.200 – 2.000	535 - 892	62	195	172	964-1.321

*Nota:* Para calcular la inversión total se tuvo en cuenta la capacidad instalada de la central: 446.000 kW.  
Fuente: Elaboración propia a partir de EPRI<sup>207</sup>

Los costes unitarios fijos y variables de O&M fueron estimados en US\$34,0/kW y US\$5,0/MWh, respectivamente (EPE,2006). A partir de estos valores, los costes totales de O&M fueron calculados teniendo en cuenta la capacidad instalada de la central (446MW) y la producción estimada de electricidad (factor de capacidad: 34%).

<sup>204</sup> Pese a que la mayoría de las centrales IGCC todavía se encuentran en fase de demostración o investigación, algunas ya han alcanzado niveles operativos normales.

<sup>205</sup> Parliamentary Office of Science and Technology. Cleaner Coal . Postnote. No. 2533. December 2005.

<sup>206</sup> EPRI.Repowering Existing Fossil Steam Plants, developed by William C. Stenzel, Dale M. Sopocy & Stanley E. Pace. Disponible en:[http://soapp.epri.com/papers/Repowering\\_Fossil\\_Plants.pdf](http://soapp.epri.com/papers/Repowering_Fossil_Plants.pdf) (consulta realizada el 13 de marzo de 2012).

<sup>207</sup> EPRI.Repowering Existing Fossil Steam Plants, developed by William C. Stenzel, Dale M. Sopocy & Stanley E. Pace. Disponible en: [http://soapp.epri.com/papers/Repowering\\_Fossil\\_Plants.pdf](http://soapp.epri.com/papers/Repowering_Fossil_Plants.pdf) (consulta realizada el 13 de marzo de 2012).

En la Tabla 6.5 se detalla el procedimiento de cálculo de los costes de capital y de O&M. El cálculo del valor presente neto asume el mismo procedimiento mencionado en los apartados anteriores. Por todo ello, el coste total asociado con la construcción y operación de una planta IGCC sería de aproximadamente 964-1.321 millones de dólares.

El consumo de carbón ha sido estimado según a la eficiencia térmica de la que dispondría dicha central IGCC (véase Tabla 6.5 ). Conviene apuntar que dicha tecnología es la que dispone de la mejor eficiencia térmica, por lo que supondría un menor consumo de carbón. El precio del insumo es el mismo calculado para las demás tecnologías. Pese a que los costes de capital son más altos con respecto a las demás alternativas, el coste total a valor presente neto solo es un 35% más elevado con relación a la alternativa más barata (PCC-ESP+FGD+SCR). Esto es debido a los ahorros que ocurrirían en el consumo de carbón (mejor eficiencia térmica).

Para completar el análisis, es necesario estimar el beneficio social asociado con esta tecnología. Al igual que en los apartados anteriores, se han determinado los porcentajes de emisiones evitadas. En el caso de una planta IGCC, las reducciones serían más elevadas con respecto a otras plantas que utilizan el carbón como insumo. En la Tabla 6.15 presentamos los resultados vinculados con la reducción de contaminantes.

**Tabla 6.15** Beneficio social según la tecnología empleada - IGCC

Tipo Tecn.	Emisiones evitadas				Costes externos - CCT (millones de US\$ 2009)					Beneficio social				
	PM <sub>10</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Total	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Δ caso estudio; Beneficio social (millones de US\$ 2009)
IGCC	100	99	98	35	-	0,29	0,15	40,7	41,2	7,7	42,1	11,02	51,7	112,5

Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar en la Tabla 6.15 que el beneficio social por año (2009) asociado con la introducción de una planta IGCC sería de 112,5 millones de dólares (coste externo caso de estudio menos coste externo IGCC). Además, se trata de la tecnología a carbón que más beneficio social generaría (véase Tabla 6.5 ).

#### 6.4.4. Alternativa D: Conversión a gas natural (*repowering*)

La última alternativa tecnológica es cambiar la configuración de la central eliminando por completo el uso del carbón e incorporar el gas natural como combustible. El proceso en cuestión es conocido como *repowering* completo y consiste en aprovechar la estructura técnica existente aplicando una turbina a gas natural. Es conveniente resaltar que existen múltiples tipos de *repowering* que incluso permiten la continuidad del carbón y, obviamente, suponen un reducido grado de modificación, inversión y tiempo de implantación (Romeo & Escosa, 2005). Conviene resaltar que dicha alternativa no se encuadra en el ámbito de las *Clean Coal Technologies*, puesto que no utiliza el carbón como insumo primario. No obstante, dicha alternativa produce un interesante parámetro de comparación, ya que una eventual utilización de la misma supondría mermar la actividad de la zona (minería).

El *repowering* completo tiene la ventaja de mejorar la eficiencia productiva, así como la relativa viabilidad técnica de adaptación. La EPE (2006) considera que las centrales a gas natural a ciclo combinado dispondrían de una eficiencia térmica mínima de un 50%. Apunta además que muchas plantas han llegado a alcanzar eficiencias cercanas a un 60%.

La eventual adaptación tecnológica de la central de Candiota (*repowering*) supondría una inversión de capital de aproximadamente 450 - 750 dólares<sup>208</sup> por kW de potencia instalada. Los costes fijos y variables de O&M para una planta típica a gas natural a ciclo combinado se situarían entre 2,5 y 4,0 US\$/MWh (EPE, 2006). En esta investigación se adoptó el promedio de estos dos últimos valores: US\$3,3/MWh; y se tuvo en cuenta la producción estimada de electricidad (MWh), la capacidad instalada (446MW) y un factor de capacidad de un 34%.

El coste del combustible se calculó en función de la producción de electricidad y según la eficiencia térmica aproximada de centrales a ciclo combinado; 50% (EPE, 2006). El precio del gas natural sigue la determinación de la *Agencia Nacional do Petróleo*<sup>209</sup> (ANP, 2002) que fijó su valor en US\$2,581/MMBTU<sup>210</sup> (2002), cabiendo la posibilidad de actualizarlo anualmente según la inflación estadounidense. De esta

---

<sup>208</sup> Dicho coste ha sido estimado basándonos en la aplicación informática SOAPP (State-of-the-Art Power Plant), desarrollada por el EPRI. Fuente: [http://soapp.epri.com/papers/Repowering\\_Fossil\\_Plants.pdf](http://soapp.epri.com/papers/Repowering_Fossil_Plants.pdf) (consulta realizada el 14 de marzo de 2012).

<sup>209</sup> ANP: Agencia Brasileña de Petróleo ([www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br))

<sup>210</sup> MMBTU: 10<sup>6</sup> BTU (British Thermal Unit)

forma, el coste del gas natural ha sido actualizado para todo el periodo estudiado (30 años) al promedio de la inflación (CPI)<sup>211</sup> estadounidense durante el periodo (2002-2009): 2,4%. En 2009, el coste unitario del gas natural estimado en este caso de estudio fue de US\$3,2/MMBTU. El descuento de dichos costes tuvo en cuenta la diferencia entre el coste de oportunidad del capital (9%) menos la inflación estimada de Estados Unidos (2,4%): 6,6%.

La introducción de una central a gas natural en ciclo combinado redundaría en un coste total del orden de US\$728-862 millones de dólares a valor presente neto<sup>212</sup> (véase Tabla 6.16 . Además, en la Tabla 6.5 se ofrecen más detalles acerca de las estimativas de los costes.

**Tabla 6.16** Costes de capital adaptación de la central de Candiota a gas natural (ciclo combinado)

	(A)	(B)	(C)	(A)+(B)+(C)
<b>Inversión US\$/kW</b>	<b>Inversión total (millones US\$)</b>	<b>Costes fijos y variables de O&amp;M (millones de US\$) Valor presente neto</b>	<b>Coste Total combustible /año (millones US\$) Valor presente neto</b>	<b>Coste total (millones US\$) Valor presente neto</b>
450 - 750	201 - 335	44	483	728 - 862

Fuente: Elaboración propia

Es interesante observar que la inversión necesaria para una adaptación (*repowering*) de la central a gas natural sería incluso inferior a la opción a lecho fluidizado y solo superaría a aquella planteada a través de los sistemas de control. Obviamente, la adaptación traería consigo la necesidad de compra del gas, que es relativamente más caro que el carbón encontrado en Candiota, y también requeriría la extensión del gasoducto desde, por ejemplo, la ciudad de Porto Alegre hasta la localidad de Candiota. Además, como se ha podido comprobar al principio de este capítulo, dicha opción acarrearía un impacto sobre la economía de la zona, al no necesitar la central el consumo de carbón para la producción de electricidad.

<sup>211</sup> Consumer price index <http://www.bls.gov/cpi/#tables> . Table Containing History of CPI-U U.S. All Items Indexes and Annual Percent Changes From 1913 to Present. (consulta realizada el 20 de mayo de 2012)

<sup>212</sup> La estimativa de los costes a valor presente neto siguió el mismo procedimiento de las demás tecnologías. Vida útil: 30 años y un coste de oportunidad del capital de un 9%.

El siguiente paso es estimar las emisiones típicas de una planta a gas natural. Para ello, la EPA<sup>213</sup> estima que una central térmica convencional a gas natural emitiría aproximadamente 0,77 kg/MWh y 0,05 kg/MWh<sup>214</sup> de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, respectivamente. Los niveles de emisión calculados por la EPA tienen en cuenta el promedio de las centrales estadounidenses, pero dichos valores son muy coherentes respecto a otros estudios realizados en Brasil (Reis, 2001). En este último estudio, se estimó un factor de emisión de 0,707 kg/MWh de NO<sub>x</sub> y se consideraron despreciables las emisiones de partículas (PM<sub>10</sub>) y SO<sub>2</sub>. Además, la Comisión Europea sitúa los niveles de emisión medios para centrales de ciclo combinado con turbina a gas natural (Europa) en 0,171 kg/MWh y 0,259 kg/MWh para NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, respectivamente, señalando como nulas las emisiones de partículas (CIEMAT, 1997). Teniendo en cuenta los valores facilitados por la EPA, las emisiones<sup>215</sup> totales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> serían de 1.023 y 66 toneladas por año (2009), respectivamente. Las emisiones de CO<sub>2</sub> han sido estimadas según un factor de emisión de 705,55 kg/MWh<sup>216</sup> y según la producción de electricidad estimada.

**Tabla 6.17** Beneficio social según la tecnología empleada – Gas natural (GN)

Emisiones (t/año)				Costes externos (millones de US\$ 2009)					Beneficio social				
PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Total	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Δ caso estudio; Beneficio social (millones de US\$ 2009)
-	66	1.023	937.233	-	0,07	2,52	48,7	51,3	7,7	42,3	8,6	43,7	<b>102,3</b>

Fuente: Elaboración propia

Tras calcular los costes externos asociados con las emisiones de contaminantes, se pudo estimar el beneficio social (US\$ 102,3 millones) que redundaría de una adaptación de la central de Candiota. Es interesante observar que, pese al relativo bajo coste de la inversión inicial, el beneficio social que generaría esta opción sería inferior a la opción IGCC e, incluso, que la PFBC. Esto ocurre debido a

<sup>213</sup> U.S. Environmental Protection Agency. Datos de emisión obtenidos a través de la base de datos “eGrid” (Emissions & Generation Resource Integrated Database), que estima las emisiones de contaminantes provenientes de la generación de energía en Estados Unidos.

<sup>214</sup> EPA(eGrid): <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/affect/natural-gas.html>. Consulta realizada el 10 de marzo de 2010. Los niveles de emisión calculados por la EPA tienen en cuenta el promedio de las centrales estadounidenses.

<sup>215</sup> La estimativa tuvo en cuenta una capacidad instalada de 446MW y un factor de capacidad de un 34%.

<sup>216</sup> Fuente: Environmental Protection Agency (EPA): eGRID2012 Version 1.0 Year 2009 GHG Annual Output Emission Rates. Disponible en:

[http://www.epa.gov/cleanenergy/documents/eGRID2012V1\\_0\\_year09\\_GHGOutputrates.pdf](http://www.epa.gov/cleanenergy/documents/eGRID2012V1_0_year09_GHGOutputrates.pdf) (Consulta realizada el 20 de mayo de 2012). Los niveles de emisión calculados por la EPA tienen en cuenta el promedio de las centrales estadounidenses. Nota: valor original 1.555, 48 lb/MWh, convertido a kg a través de la relación: 1 kg = 2,204 lb.

las emisiones de CO<sub>2</sub>, que son superiores a las centrales IGCC y PFBC. Además, la planta a gas natural sigue generando niveles de emisión de NO<sub>x</sub> similares a las demás tecnologías.

### **6.5. Costes de capital de las alternativas tecnológicas y beneficios sociales que aportarían**

Tal y como hemos mencionado anteriormente, uno de los objetivos sobre los que se asienta este capítulo es ofrecer informaciones acerca de los beneficios sociales que podrían generar distintas alternativas tecnológicas así como su correspondiente coste de capital. Conviene apuntar que cada una de las alternativas planteadas causaría externalidades, que serían en cualquier caso inferiores a la situación actual.

Tras analizar los aspectos técnicos y la eficiencia ambiental de cada alternativa, hemos podido comprobar el potencial de reducción de las externalidades que conllevaría cada una de ellas. En el caso de los sistemas de control, las externalidades podrían verse reducidas en aproximadamente un 30%. En lo que se refiere al lecho fluidizado, la opción AFBC reduciría las externalidades en un 41% y el PFBC en un 55%. La alternativa del gas natural generaría una reducción de un 51%, mientras que el IGCC de un 61%. Un análisis exhaustivo de las externalidades asociadas con cada una de las alternativas tecnológicas supondría evaluar técnicamente los criterios de implementación y estudiar a fondo las emisiones que redundarían<sup>217</sup> en función de la eficiencia térmica y ambiental de cada una.

Por otro lado, se hace necesario estimar los beneficios sociales asociados con una eventual introducción de cada una de las tecnologías planteadas en esta investigación. Tal y como hemos comentado anteriormente, dicho beneficio se calcula restando el coste externo asociado con la configuración actual de la central y según un factor de capacidad de un 34% y el coste externo asociado con cada una de las tecnologías. Conviene recordar que ha sido necesario estimar los costes externos según un factor de capacidad de un 34% una vez que la estimación realizada para el caso de estudio tuvo en cuenta la producción de electricidad (y por ende las emisiones) en 2009 (factor de capacidad de un 23%).

---

<sup>217</sup> Las reducciones que presentamos son porcentajes estimados por la literatura, pero la eficiencia térmica y ambiental dependerá de una serie de factores como los criterios técnicos de implementación, calidad de carbón, etc.



$$\text{Beneficio social adaptación} = \frac{\text{Coste externo configuración actual}}{\text{Factor de capacidad 34\%}} - \frac{\text{Coste externo tecnologías}}{\text{Factor de capacidad 34\%}}$$

Además, es necesario calcular el valor presente neto de los mismos teniendo en cuenta una tasa social de descuento de un 3% y un periodo de treinta años (vida útil de la central). La tasa social de descuento ha sido obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$i = z + n \times g$$

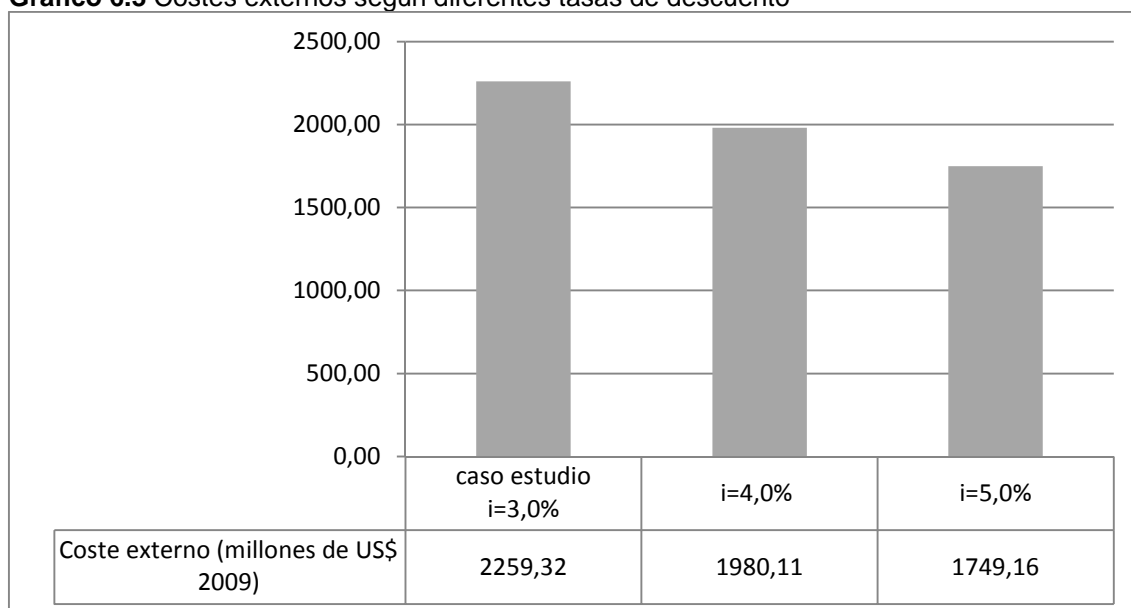
*Ecuación 6-9*

Donde **i** es la tasa social de descuento; **z** es la tasa de preferencia temporal pura; **n** es la elasticidad de la utilidad marginal de consumo y **g** es la tasa de crecimiento del PIB per cápita. De esta forma, se asumió que **z** es igual a 0, **g**<sup>218</sup>, que es igual a un 3% (tasa de crecimiento del PIB per cápita para Brasil)<sup>219</sup> y **n** es igual a 1,0. No obstante, aunque pueda parecer una tarea fácil, la correcta elección de la tasa de descuento requiere un proceso cauteloso que, en mayor medida, trate de reflejar la realidad del país donde se realice el estudio. Para tener una amplia idea de la influencia de la tasa de descuento sobre los resultados del caso de estudio, presentamos en el Gráfico 6.3 la composición de los costes externos en el caso de que variásemos este parámetro según dos escenarios: **i = 4%** y **i = 5%**. Observamos en este sentido que una tasa de descuento de un 4% y 5% haría descender el coste externo en aproximadamente un 12% y un 23%, respectivamente.

---

<sup>218</sup>Según el informe "The World in 2050" de la consultora PricewaterhouseCoopers (Hawksworth, J., 2006) el PIB per cápita brasileño crecerá al ritmo de un 3,2% entre 2005 y 2050. Además, según los datos del Banco Mundial (indicator: GDP per capita *growth* - annual %-) entre los años 2000 y 2010 el PIB per cápita creció a un ritmo de un 2,5%. De esta forma, nos ha parecido adecuado suponer una tasa de crecimiento del PIB per cápita de un 3,0%

**Gráfico 6.3** Costes externos según diferentes tasas de descuento



Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocido el beneficio social que aportaría cada alternativa tecnológica, procederemos a analizarlo junto con la inversión (coste de capital) que supondría su incorporación. Además, siguiendo los criterios mencionados en el capítulo 5, hemos analizado la incertidumbre de estos beneficios o costes evitados. La ejecución de este análisis tuvo en cuenta dos de los escenarios relacionados con las toxicidades de los contaminantes que fueron planteados en el análisis de sensibilidad (capítulo cinco) y uno (estimación central) que abarca la toxicidad de todos los contaminantes sumado a los efectos del cambio climático. Además, se incorpora un escenario que analiza los beneficios sociales en el caso de que no se incluyera la mortalidad crónica en la estimación de los costes externos. Conviene recordar que en el análisis de sensibilidad se han comparado los costes externos bajo distintos enfoques, que van desde una perspectiva conservadora (ej. solo incluyendo los efectos de las partículas) hasta alcanzar la estimación real realizada en este caso de estudio, que considera los efectos de todos los contaminantes. Además, nos permitirá también esbozar una comparativa eliminando aquellos aspectos que más hacen variar el impacto, o bien considerar distintos niveles de toxicidad de los contaminantes.

Hay que mencionar que los escenarios de comparación son más bien infinitos. Básicamente, todos aquellos puntos que han sido abordados en el análisis de sensibilidad podrían ser incluidos. Sin embargo, para una mayor racionalidad sintética, hemos seleccionado aquellos que han sido detectados como los más influyentes sobre

la composición del coste externo total, bien por la incertidumbre que acarrearán, o por su peso relativo sobre el impacto total.

Los cuatro escenarios previstos son:

- **Escenario 1:** toxicidad equivalente para todos los contaminantes (PPM<sup>220</sup> y SPM) y cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>).
- **Escenario 2:** únicamente efectos de las partículas (PPM).
- **Escenario 3:** toxicidad de las partículas (PPM) y sulfatos, sin efectos de los nitratos.
- **Escenario 4:** coste externo total sin incluir la mortalidad crónica.

Analicemos estos escenarios con más detalle:

#### 6.5.1. *Escenario 1: toxicidad equivalente para todos los contaminantes (PPM y SPM) y cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>)*

Este escenario engloba los costes externos de los daños sobre la salud humana causados por los contaminantes primarios (PM<sub>10</sub>) y secundarios (nitratos y sulfatos). Además, se incluyen los efectos del cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>). Es importante señalar que este escenario confluye con la estimación central del caso de estudio y por ende se conforma como el escenario preferido.

En el Gráfico 6.4 se pueden observar los beneficios que genera la introducción de cada tecnología y los costes privados que derivarían de su implementación. Podemos observar en este sentido que en todos los casos planteados el beneficio social supera el coste privado asociado con una eventual adaptación. El lecho fluidizado atmosférico (AFBC), a pesar de disponer de costes de inversión inicial menores que el lecho fluidizado presurizado (PFBC), dispondría de una eficiencia térmica menor, consumiría entonces más carbón y, por ende, dispondría de un coste (inversión inicial sumada a O&M y consumo de combustible) más elevado. Así, podemos observar que el PFBC generaría más beneficios sociales que el sistema AFBC, a prácticamente el mismo coste que la segunda. También es interesante

---

<sup>220</sup>PPM y SPM: Contaminantes primarios y secundarios, respectivamente.

observar que, dada la incertidumbre, el límite inferior de los beneficios del sistema PFBC no dista demasiado del límite inferior del coste privado para introducirlo.

La opción IGCC también se presenta como una eventual alternativa dada la reducción de los costes externos que aportaría. La diferencia con respecto al PFBC es que dispone de un coste privado más elevado. Cabe resaltar que los beneficios sociales que traería la planta IGCC superaría ligeramente el PFBC. Ambas tecnologías (IGCC y PFBC) disponen de esta manera eficiencias mitigadoras parecidas, pero la gran ventaja del IGCC con respecto al PFBC es la eficiencia operacional que dispone, puesto que podría funcionar con altos factores de carga y eficiencia térmica. Cabría entonces investigar técnicamente si el IGCC sería conveniente para el caso de Candiota una vez que las características del sector eléctrico brasileño, tal y cómo hemos mencionado en el capítulo dos (alta participación de las hidráulicas), harían con que parte de las centrales térmicas operasen a bajos factores de capacidad con respecto a la media mundial.

Los sistemas de control (FGD, ESP y SCR) disponen de un coste de capital relativamente bajo, comparado con otras alternativas que utilizan el carbón como insumo. Sin embargo, al mantener la configuración actual de la central no se producirían mejoras en la eficiencia térmica y, por ende, el consumo de carbón seguiría siendo equivalente al contexto actual. El gas natural traería también buenos resultados en términos reducción de los costes externos, pero la utilización de esta última tecnología conllevaría al cierre de la minería produciendo así un gran impacto sobre la economía de la región (véase apartado 6.2). Además, no se contemplan en su estructura de costes una eventual extensión del gasoducto hasta la ciudad de Candiota, hecho que haría con los costes de inversión fuesen aún más elevados.

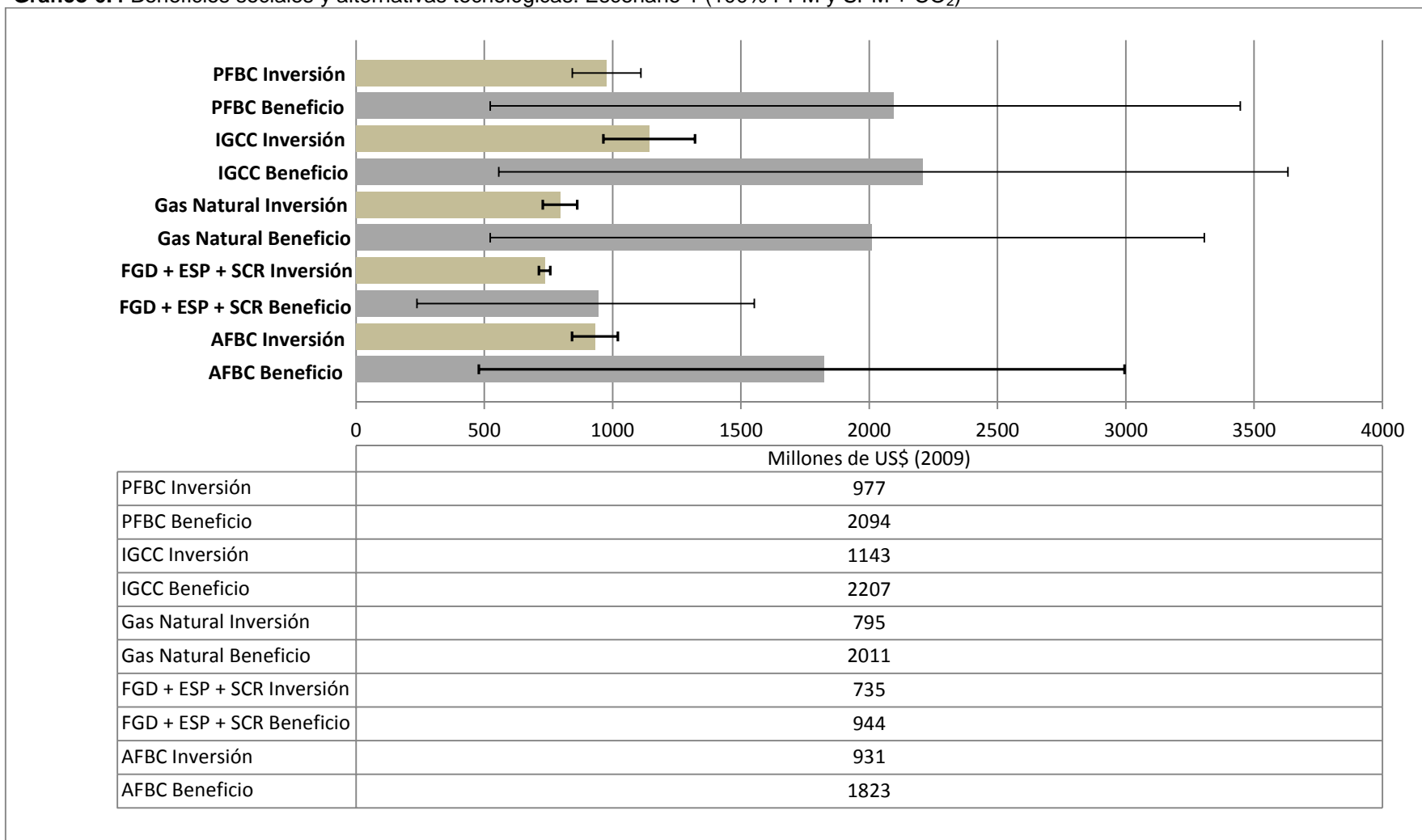
De esta manera, a partir del análisis del Gráfico 6.4 todo apuntaría que la alternativa PFBC sería la opción que podría ofrecer una pauta al planificador de cara un estudio más profundo acerca de su viabilidad. Dicha conclusión se asienta en el hecho de que reduce considerablemente el daño (ligeramente inferior a la IGCC) pero a un coste algo inferior a esta última. Conviene resaltar que los beneficios han sido descontados a valor presente a una tasa social de descuento de un 3%. En el Gráfico 6.5 se presentan los resultados en el caso de que asumiéramos una tasa de descuento de un 5%<sup>221</sup>. Podemos observar que, mismo si utilizásemos una tasa de

---

<sup>221</sup> La tasa de descuento ha sido estimada en base a la ecuación  $i = z + n \times g$  (ecuación 6.9), donde,  $z=1\%$ ;  $g=4\%$  y  $n=1,0$ .

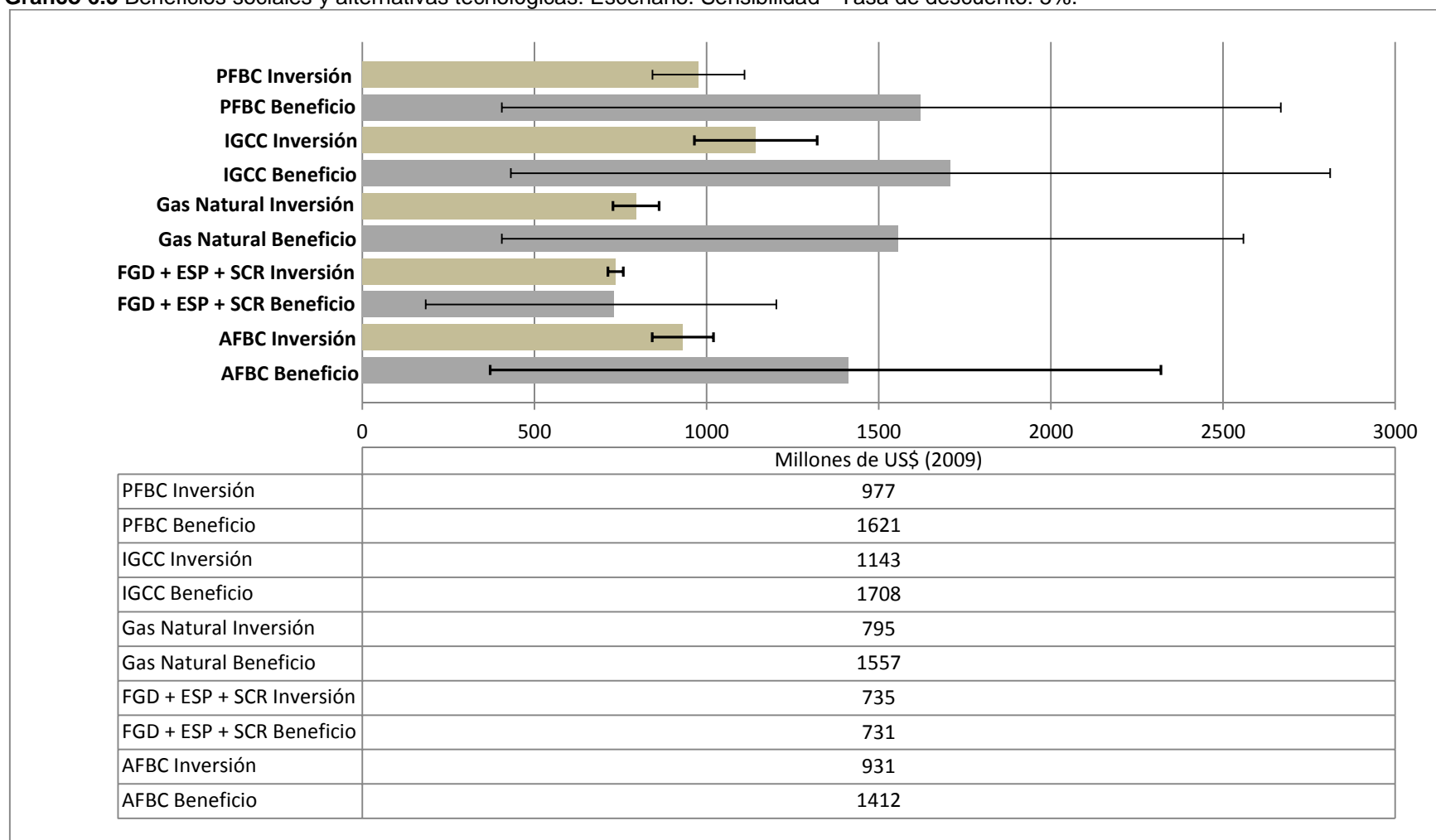
descuento de un 5%, la composición final de los beneficios sociales apuntaría hacia la adopción de medidas, las cuales el planificador podría profundizar el análisis.

**Gráfico 6.4** Beneficios sociales y alternativas tecnológicas: Escenario 1 (100% PPM y SPM + CO<sub>2</sub>)



*Nota: Coste externo. Intervalo de confianza 68%.  $\sigma=3,0$  para las partículas, 3,5 para los sulfatos, 4,0 para los nitratos y 5,0 para el CO<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia.*

**Gráfico 6.5** Beneficios sociales y alternativas tecnológicas: Escenario. Sensibilidad - Tasa de descuento: 5%.



Fuente: Elaboración propia.

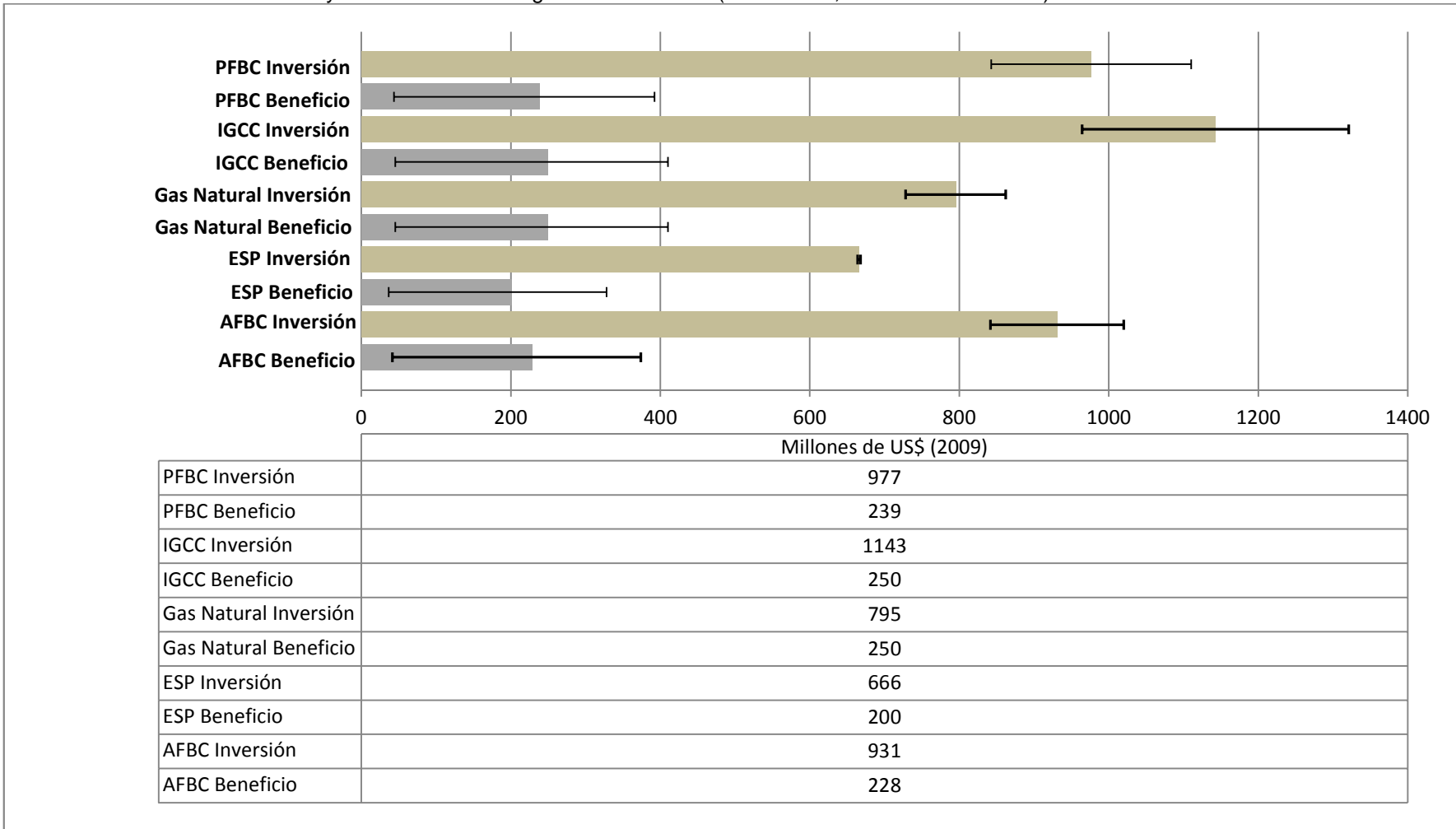
#### 6.5.2. *Escenario 2: únicamente efectos de las partículas (PPM)*

El análisis planteado en este escenario responde a una de las posturas más conservadoras con respecto al coste externo sobre la salud humana. En ella, solo se consideran los efectos nocivos de las partículas omitiendo de esta manera aquellos relacionados con los sulfatos y nitratos. Además, no se tendrían en cuenta los efectos vinculados con el cambio climático.

Del análisis del Gráfico 6.6 se puede llegar a la conclusión de que bajo este escenario, a priori, ninguna de las alternativas parece apuntar hacia una solución viable. Aquí hay que volver a mencionar que la ubicación de la central (zona rural) hace que los efectos a nivel local y, por ende, de las partículas sean reducidos en comparación con casos de centrales situadas cerca de grandes centros poblacionales. Es un hecho que mencionamos en el análisis de sensibilidad y, por ello, en el hipotético caso de que la central de Candiota estuviese localizada cerca de una gran ciudad, otras alternativas como el lecho fluidizado podrían ofrecer mejores resultados.



**Gráfico 6.6** Beneficios sociales y alternativas tecnológicas: Escenario 2 (100% PPM; sin cambio climático)



Fuente: Elaboración propia.

*Nota: En el caso de los sistemas de control solo se consideró el sistema ESP puesto que en este escenario se considera que los nitratos y sulfatos no producirían daños sobre la salud humana.*

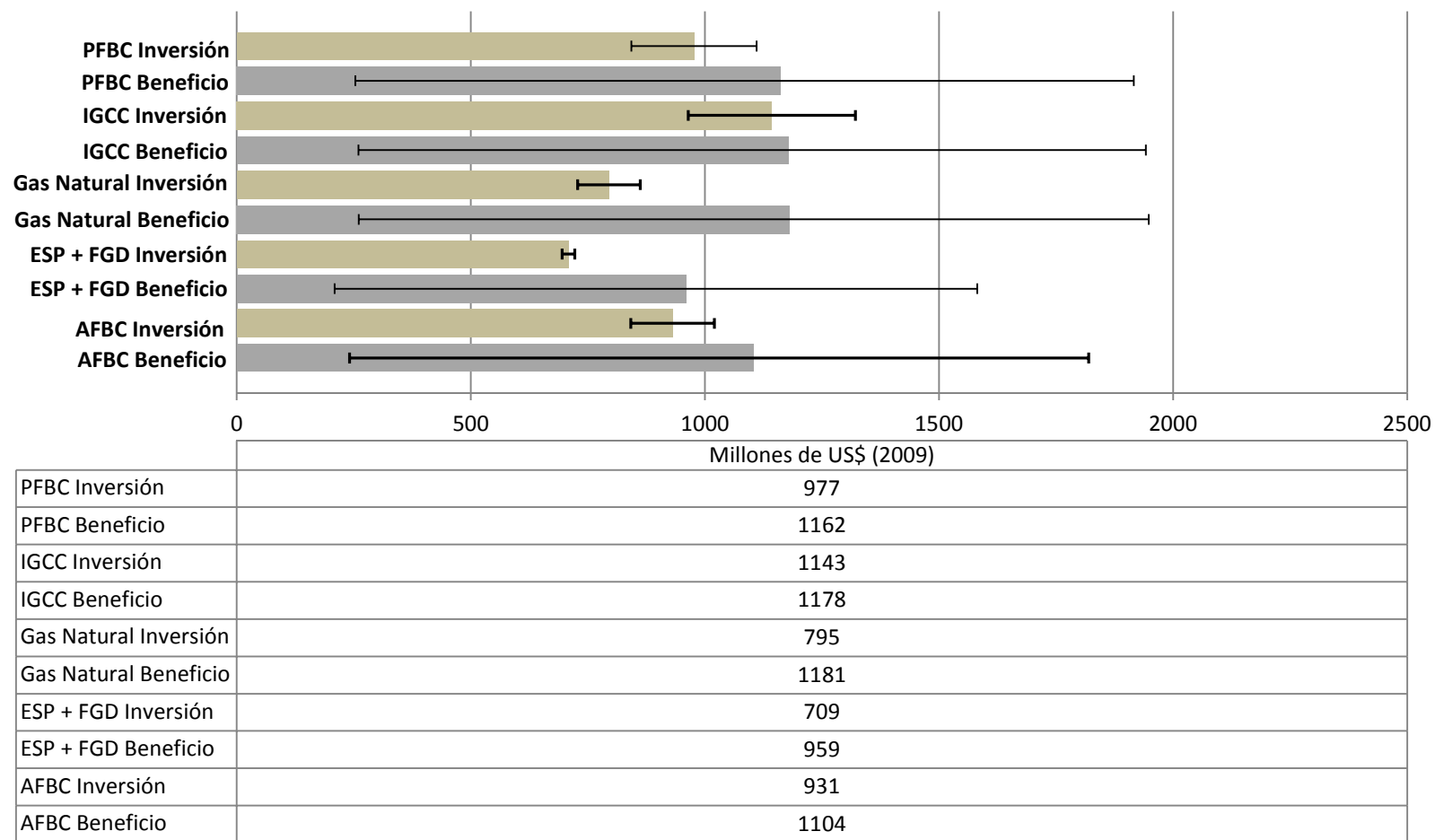
### 6.5.3. *Escenario 3: toxicidad de las partículas (PPM) y sulfatos, sin efectos de los nitratos*

El tercer escenario también asume una postura conservadora con respecto a los impactos sobre la salud humana. En este caso solo considera como nocivos para la salud humana los efectos de las partículas y sulfatos, considerando de esta manera nulos los daños de los nitratos. Tampoco se tienen en cuenta los efectos del cambio climático.

En un contexto de incertidumbre, mismo sin considerar estos dos importantes aspectos (nitratos y cambio climático), a priori podría resultar viable una modificación introduciendo, por ejemplo, el PFBC o IGCC.

Observamos, además, que el gas natural presenta también un elevado beneficio social, pero su inconveniente resulta en que esta opción deja de utilizar el carbón como recurso hecho que podría suponer un impacto sobre la economía de la localidad de Candiota. Hay que mencionar que todas las opciones podrían resultar viables cara a una adaptación futura. Obviamente que esta intervención requeriría un estudio técnico más preciso así como realizar un análisis coste beneficio.

**Gráfico 6.7** Beneficios sociales y alternativas tecnológicas: Escenario 3 (100% PPM; 100% sulfatos; 0% nitratos; sin cambio climático)



Fuente: Elaboración propia.

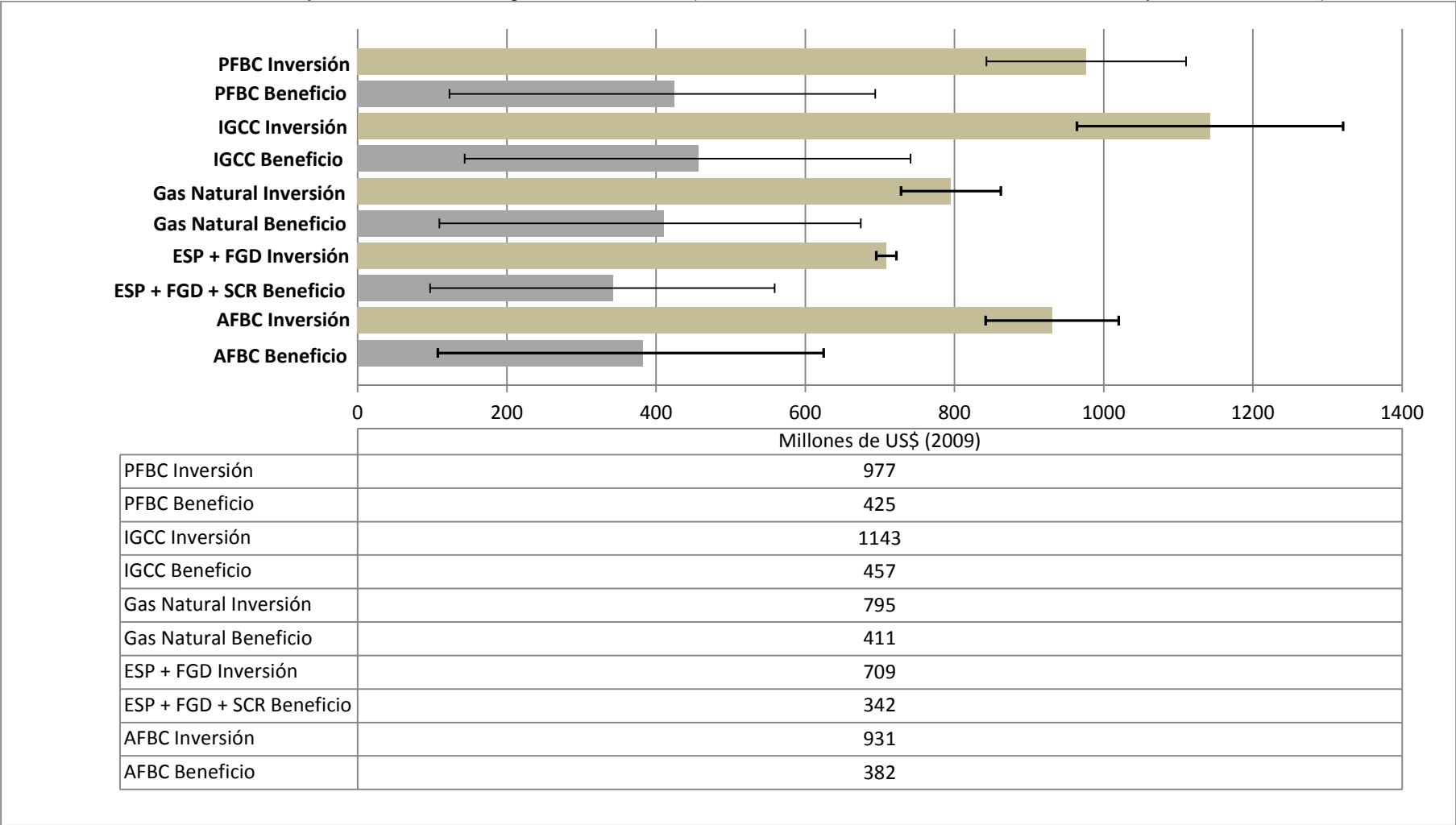
*Nota: En el caso de los sistemas de control, solo se adoptaron a efectos de estimar la inversión los sistemas ESP (control partículas) y FGD (control SO<sub>2</sub>) puesto que en este escenario se considera que los nitratos no producirían daños sobre la salud*

#### 6.5.4. *Escenario 4: coste externo total sin incluir la mortalidad crónica*

Este escenario tiene que ver con la forma de abordar la mortalidad crónica. Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, este aspecto de salud es muy representativo sobre el coste externo total. Conviene recordar que, en la estimación realizada en este caso de estudio, la mortalidad explica un 62% del impacto total. Al eliminar dicho criterio del análisis, solo estaríamos incluyendo la morbilidad en el cómputo de los costes externos. Por otro lado, la controversia acerca de la metodología asociada con su utilización (YOLL vs. nº de muertes) así como la estimación del coste unitario (elección de la tasa de descuento, transferibilidad hacia otros contextos, etc.) hace que su función concentración-respuesta atraiga un relativo grado de incertidumbre.

Del análisis del Gráfico 6.8 , podemos observar que la mortalidad crónica es un aspecto muy relevante a la hora de estimar los impactos. Por este motivo, sin ella, no se abriría, a priori, ninguna solución viable hacia la mitigación de los impactos.

**Gráfico 6.8** Beneficios sociales y alternativas tecnológicas: Escenario 4 (100% PPM; 100%SPM; sin Mortalidad crónica y cambio climático)



Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 7 : Conclusiones**

Esta tesis ha sido desarrollada en seis capítulos. El primer capítulo introduce la problemática planteada en esta investigación, así como los aspectos estructurales que de ella derivan. El segundo capítulo, presenta, por un lado, el panorama del sector energético brasileño, en particular de la producción de electricidad. Además, enmarca el estado actual del carbón como recurso energético. Por otro lado, ofrece una vía descriptiva acerca de la actualidad social, económica y medioambiental del municipio de Candiota, donde se encuentra instalada la central termoeléctrica y se desarrolla la actividad minera. El tercer capítulo describe el estado de la cuestión de los estudios vinculados con la valoración económica de las externalidades de la energía. El cuarto capítulo detalla los aspectos metodológicos que han sido utilizados a la hora de ejecutar el análisis propuesto en esta investigación. Cabe destacar en este sentido, los aspectos que conciernen al *Uniform World Model* (Spadaro, 1999), modelo que ha sido utilizado en esta investigación con el objetivo de medir los impactos que causa la actividad (termoeléctrica) sobre la salud humana. En este capítulo, el lector podrá encontrar los datos autóctonos (caso de estudio) que han sido calculados para su posterior introducción en el modelo (UWM). El quinto capítulo se configura como el núcleo de esta investigación. En él, se pueden observar los resultados asociados con las externalidades sobre la salud humana y el cambio climático. Además, debido a la incertidumbre que suponen estudios de estas características, se ofrece también un exhaustivo análisis de incertidumbre y sensibilidad. El último capítulo estudia, en un primer momento, la importancia de la actividad para la economía de la región (minería) para que, partiendo de estos resultados, se analicen las correspondientes alternativas tecnologías dirigidas a la mitigación de los impactos. Para ello, se estimó el coste total que supondría cada una de ellas y el beneficio social que generarían (reducción de emisiones con respecto al estado actual).

Valga la estructura mencionada en el párrafo anterior para recalcar que el objetivo final que persigue esta tesis no es otro que brindar informaciones adicionales al planificador que, en cualquier caso, ayuden en el proceso de toma de decisiones. A tal efecto, el agente que tiene en sus manos la decisión tendrá a su disposición una serie de informaciones sobre las que podría alimentar los flujos decisorios pautados en la reducción de los impactos derivados de la contaminación atmosférica por fuentes fósiles. De esta forma, el caso de estudio de la central termoeléctrica Presidente Médici (Candiota) asume también un carácter instrumental y no es solo un fin en sí mismo. Es decir, además de crear pautas específicas para la solución del problema de Candiota, puede servir como punto de partida para estudios de igual naturaleza, coherentes con el ámbito geográfico aquí estudiado. Con esto queremos decir que

aquellas informaciones utilizadas para analizar este caso de estudio permiten una amplia aplicación, con los debidos ajustes, en otras centrales o actividades insertadas dentro del contexto estudiado. Tras un exhaustivo análisis de las informaciones requeridas por el UWM y, en cualquier caso, partiendo de las informaciones disponibles en el marco, por ejemplo, del proyecto ExternE, hemos podido generar parámetros propios cuyos antecedentes no servirían para explicar la realidad de los países afectados en este estudio. Con ello queremos señalar que el decisor podrá echar mano de las informaciones aquí trabajadas para estudiar otros casos específicos, o bien utilizarlas para el diseño de políticas públicas en el ámbito de la sostenibilidad. Estamos de esta manera planteando las conclusiones en dos bloques principales, es decir, aquellas que derivan del proceso mismo de la tesis y las que redundan de los resultados alcanzados.

En términos del proceso de investigación, recalcamos que la complejidad asociada, sobre todo con los aspectos de salud, obligó a realizar un análisis exhaustivo en cuanto a su adaptación al contexto del estudio. No hay que perder de vista que muchos de los estudios precursores sobre las externalidades de la energía tuvieron lugar en contextos ajenos al mundo en desarrollo, lo que nos obliga alzar una mirada crítica sobre la viabilidad o mejor procedimiento para transferirlos hacia la realidad del caso de estudio. Prueba de esta dificultad son los estudios epidemiológicos que determinan las tasas de incremento de riesgo relativo (IRR), elemento fundamental de las funciones concentración-respuesta. La mayoría de los estudios de notoria relevancia han sido desarrollados en países de Occidente. Lo mismo ocurre con los costes unitarios provenientes de estudios de valoración contingente. En ocasiones, ante la carencia de estudios autóctonos realizados en países en desarrollo, el investigador deberá encontrar la mejor manera de trasladarlos a la realidad del estudio.

Uno de los primeros aspectos que hemos identificado en el tratamiento de los datos, han sido las tasas de emisión verificadas para la central de Candiota. En ella, hemos constatado que los niveles actuales de emisiones de contaminantes presentadas por la central son elevadas en comparación con la media internacional de centrales con las mismas características y que, por ende, producen grandes impactos al medioambiente y a la salud de la población. Esta constatación va en línea con las conclusiones presentadas por los diversos autores citados en el capítulo dos. Además, en este mismo capítulo, hemos visto como la composición del carbón encontrado en el



yacimiento de Candiota tiene un bajo contenido en carbono fijo y alto en cenizas y materia volátil con relación a la media internacional.

Otro aspecto vinculado con los datos de entrada tiene que ver con las velocidades de remoción o *depletion velocity* (DV). Habida cuenta de que los impactos producidos por la central se extienden, además de Brasil, por otros tres países vecinos (Argentina, Uruguay y Paraguay) y que los valores de las DV vienen dadas por países, hemos tenido que encontrar un solo valor medio por contaminante que refleje la realidad integral del caso de estudio. Además, en el análisis de sensibilidad hemos analizado la variabilidad de los resultados según distintas DV demostrando que los valores aplicados en el caso de estudio representan la estimación central.

Las funciones concentración-respuesta (CRF) son otro parámetro importante que podría ofrecer interesantes pautas para estudios adscritos a la misma realidad del caso de estudio. La mortalidad crónica es un claro ejemplo en esta línea. Esta función ha sido adaptada a la realidad del caso de estudio a partir del análisis de las tablas de vida de los cuatro países pertenecientes al dominio de impacto, con el objetivo de determinar la tasa de incidencia (muertes por persona por año a causa de la contaminación) y los correspondientes años de vida perdidos (YOLL). Se encontró, por ejemplo, que el promedio de los YOLL para el caso de estudio fue de 16, mientras que en Europa el valor se sitúa en 11 YOLL. Esta diferencia ocurre debido a las diferencias existentes en la distribución poblacional entre Europa y los países analizados en esta investigación. Tanto en Brasil, como en Argentina, Uruguay y Paraguay hay más cantidad de población joven, lo que supone más pérdidas de YOLL con respecto a Europa. De esta forma, las CRF analizadas en esta tesis podrían dar lugar a buenas aproximaciones para la ejecución de estudios futuros con las mismas características.

Los costes unitarios son una variable indispensable para la valoración monetaria. Dichos costes pueden representar, por ejemplo, el coste asociado con el tratamiento de una determinada enfermedad o aquellos vinculados con las pérdidas de productividad. Por otro lado, existen otros que expresen la disposición a pagar para evitar el sufrimiento y vienen dados por estudios de valoración contingente. Es el caso por ejemplo del valor de un año de vida perdido (VOLY), cuyo cálculo deriva de las estimativas del valor de una vida estadística (VSL). Este último valor deriva a su vez de estudios de valoración contingente realizados en países desarrollados, cuyos niveles de renta son a veces más elevados con relación a los países donde se quiera realizar el estudio. Las diferencias (ej. de renta) entre los países donde se realizó el

estudio y aquellos que van a ser objeto del mismo, obliga a transferir los resultados de los costes unitarios teniendo en cuenta parámetros como el PIB per cápita en paridad de poder adquisitivo (PPPGDP per cápita) o la elasticidad renta de la DAP. A este procedimiento lo denominamos *benefit transfer*, cuya construcción debe reportar coherencia so pena de sobrestimar (o subestimar) los costes externos. Por todo ello, en este caso de estudio, hemos simulado el *benefit transfer* teniendo en cuenta la variación de los distintos parámetros hasta encontrar aquellos que más podrían ajustarse a la realidad del caso de estudio. Se estudió, por ejemplo, la composición del coste externo según distintos valores de las elasticidades renta de la DAP. Pese a que el PPPGDP per cápita aparece como el más adecuado a la hora de transferir los costes unitarios debido a que capta las diferencias de renta, también hemos simulado los costes externos utilizando también el PIB per cápita. Como se puede comprobar, en términos del coste unitario, el planificador podrá variar y elegir los parámetros del *benefit transfer* según el juicio de valor o preferencias que quiera adoptar. Queda a su disposición una serie de posibilidades y datos a la hora de trasladar un determinado coste (ej. coste unitario derivado de un estudio de valoración contingente realizado en Europa) hacia un contexto diferente de su precursor (*policy site*).

Otro aspecto relevante de las vías de impacto que se ha analizado en esta investigación es el tratamiento de los datos meteorológicos. En él, hemos visto que, dada la localización de la central (rural), los impactos a escala local son reducidos con relación a una central ubicada en una zona urbana, hecho que no requiere un análisis detallado de las concentraciones a escala local. Se ha simulado, por ejemplo, el estado de costes externos a partir de la versión simplificada del modelo (SUWM), que no incluye datos meteorológicos avanzados, detectando que la estimación a partir del SUWM solo es un 8% (simulación para las  $PM_{10}$ ) más elevada con relación a la estimación central que se hizo a través de la versión robusta del modelo (RUWM). Por este motivo, cuando se trate de medir los impactos de una central ubicada en una zona rural, el SUWM retornaría resultados muy aproximados con respecto a la versión robusta. Cabe recordar que la necesidad de datos del SUWM es inferior a la versión robusta (RUWM). Esta es una información valiosa para futuros usuarios que quieran elegir la versión del modelo, según la escala del estudio. Otro aspecto de los datos meteorológicos son las estimaciones de la concentración a escala local. La versión robusta del modelo permite estimar, aunque de forma muy aproximada, las concentraciones existentes en un radio inferior a 50 km (local). A pesar de que una simulación exhaustiva de las concentraciones requeriría modelos de dispersión avanzados, la facilidad de obtener dichas concentraciones aproximadas a través del

RUWM puede servir de apoyo a la toma de decisiones. Conviene resaltar que muchas veces, dependiendo de la escala de análisis (ej. *top-down*), durante el proceso de toma de decisiones se requieren solamente valores aproximados. Hemos calculado en este sentido las concentraciones simuladas para la región de Candiota. Valga la redundancia para volver a matizar que dichos valores no intentan predecir las concentraciones con gran precisión, sino ofrecer un valor aproximado. Por otro lado, los datos meteorológicos tratados han llegado a la conclusión de que la condición de la atmósfera según las categorías de estabilidad de Pasquill varía entre un 46% neutral (Pasquill, clase D) y un 26% estable (Pasquill, clase F). En lo que concierne a los datos meteorológicos, también ofrecemos una detallada metodología para orientar al lector en su tratamiento.

En términos de los resultados, hemos detectado que la central genera un impacto elevado si la comparamos con otros emplazamientos de iguales características. Sumadas, las externalidades sobre la salud (US\$ 41,4 millones) y el cambio climático (US\$ 62,4 millones) ascienden a 103,8 millones de dólares a precios del 2009. Dicha externalidad representa el coste de US\$115 por MWh de energía eléctrica generada, casi dos veces (1,6) el precio comercializado por la central. En términos del impacto sobre la salud, hemos visto que los sulfatos son responsables de gran parte del daño (69%), seguidos de los nitratos (18%) y partículas (12%). También se ha constatado que el impacto a escala local (<50km) solo representa el 1% del total (99% regional; > 1.000km). Asimismo, se comprobó que la mortalidad crónica explica la mayor parte del impacto (62%) y la morbilidad un 38%.

Conocidos los resultados de la investigación, se realizó un análisis de incertidumbre. Este análisis resulta de particular relevancia puesto que se ha analizado individualmente cada fuente de incertidumbre, en aras de determinar las desviaciones geométricas estándar. Dada la naturaleza multiplicativa del análisis, los intervalos de confianza de los resultados han sido calculados asumiendo una distribución log-normal. Ha sido particularmente interesante observar cómo afectan determinados parámetros como las velocidades de remoción (DV) o las funciones concentración-respuesta (CRF) sobre la incertidumbre general de los resultados. Esta evaluación (incertidumbre) nos ha ofrecido pautas para plantear el análisis de sensibilidad. Este último análisis buscó variar una serie de parámetros del modelo y observar cómo se han comportado los resultados. La sensibilidad de los resultados planteó distintos escenarios para las velocidades de remoción y hemos corroborado que las mismas tienen gran influencia sobre los resultados. Otro aspecto abordado fue la forma de

tratar la mortalidad, bien sea a través de los YOLL (estimación preferida) o según el nº de muertes. Aunque el número de muertes ( $VSL \times n^\circ$  de muertes prematuras) suele sobrestimar el impacto, en este caso de estudio la diferencia no es muy elevada, sobre todo debido a las diferencias en la distribución de la población con respecto a los análisis llevados a cabo en Europa. También se plantearon escenarios (sensibilidad) relacionados con la toxicidad de los contaminantes. Es decir, suponiendo, por ejemplo, que algunos compuestos secundarios como los nitratos y sulfatos no producirían daños sobre la salud. Se ha constatado que los sulfatos y nitratos producen gran influencia sobre la composición de las externalidades.

En la última parte de la investigación hemos analizado la relación entre la actividad (minería) y la economía del municipio de Candiota. Tras ejecutar un análisis aproximado ofrecido por el multiplicador keynesiano local, se detectó que casi toda la población activa depende de la minería. Se ha visto también cómo el PIB del municipio se ve fuertemente condicionado por la actividad. El impacto sobre la renta ha sido estimado en US\$ 58 millones, esperando que la actividad esté generando aproximadamente 3.500 puestos de trabajo (un 87% de la población activa). Por otro lado, el impacto sobre la producción supone un 65% del PIB del municipio.

Otro aspecto analizado en esta parte han sido las alternativas tecnológicas que podrían ofrecer alguna pauta a la solución del problema. En este bloque, basándonos en las tecnologías disponibles en el mercado, se propusieron algunas eventuales soluciones dirigidas a reducir el nivel de emisiones con respecto a la situación encontrada actualmente. Son las siguientes: a) nuevos sistemas de combustión a lecho fluidizado (atmosférico; AFBC y presurizado; PFBC); b) introducción de sistemas de control de partículas (ESP),  $SO_2$  (FGD) y  $NO_x$  (SCR); c) *repowering* de la planta introduciendo un sistema de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC) y d) *repowering* de la planta a gas natural.

En este sentido, para cada una de estas tecnologías, se estimaron los costes de capital, de operación y mantenimiento (O&M) y, sumados a la parcela variable de estos últimos, los costes relacionados con el consumo de combustible. Hemos observado, por ejemplo, que los sistemas de control disponen de costes de capital que están por debajo de las demás opciones. A modo ilustrativo, tomando los límites inferiores, los sistemas ESP, FGD y SCR representan un 18% de la inversión relacionada con la combustión en lecho fluidizado atmosférico (AFBC). No obstante, la introducción de estos sistemas no mejora la eficiencia térmica de la central, hoy

situada en un 20% (las demás opciones ofrecen rendimientos térmicos superiores a un 34%) por lo que el consumo de combustible mantendría la tendencia actual, aumentando los costes relacionados con el consumo de carbón y la emisión de contaminantes. Este hecho conlleva que se reduzcan las diferencias en los costes finales con respecto a las demás tecnologías. Además, las eficiencias ambientales (reducción de emisiones) de los sistemas de control (y los beneficios sociales) son inferiores con respecto a las demás tecnologías. Algo parecido ocurre entre los dos sistemas de combustión a lecho fluidizado. El punto de partida (costes de capital) del AFBC es inferior a su homólogo (PFBC) pero las ganancias en términos de eficiencia térmica (reducción del consumo de combustible) y reducción de emisiones (reducción de las externalidades) hacen que al final ambas dispongan de costes similares. Si comparamos el PFBC con las demás tecnologías, en términos de la eficiencia ambiental (emisiones), costes fijos y variables (O&M) y consumo de combustible, parece que esta opción podría resultar la mejor alternativa hacia la mitigación de los impactos bajo un punto de vista social.

La opción IGCC es la tecnología que más beneficios sociales generaría en toda la vida útil estimada en esta investigación (30 años). No obstante, dispone del coste (inversión inicial más costes de O&M y combustible) más elevado entre las demás opciones. El *repowering* a gas natural dispone de costes de capital relativamente bajos (opción más barata después de los sistemas de control), pero a los costes de O&M hay que sumar aquellos relacionados con la compra del combustible (gas natural) cuyo monto final solo perdería para el estado actual de la central (consumo de carbón a una eficiencia térmica de un 20%). Los beneficios sociales que aportaría el gas natural serían considerables aunque ligeramente inferiores al PFBC e IGCC. Dicha diferencia ocurre debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>. No obstante, el *repowering* a gas natural tiene el inconveniente de que dejaría de utilizar el carbón como insumo energético, hecho que posiblemente mermaría la economía de la zona, muy dependiente de la economía del carbón. Como se ha visto, la práctica totalidad de la producción de carbón (76%) se destina a la termoeléctrica, por lo que un eventual cierre de la misma supondría afectar también a la mina. Por este motivo, no parecería razonable plantear esta solución como alternativa al problema bajo un punto de vista de sostenibilidad.

En definitiva, en términos de las alternativas tecnológicas, los resultados encontrados apuntan a que las tecnologías limpias del carbón (*Clean Coal Technologies*) son un importante medio a la hora de mitigar los impactos de la generación termoeléctrica que utilizan el carbón como insumo. Los mecanismos como,

por ejemplo, el lecho fluidizado, principalmente el PFBC, se postulan como una buena alternativa en cuanto a la reducción de las emisiones a un coste privado razonable. Actualmente, se habla incluso de plantas “cero emisión”, pero a un coste que inviabiliza su aplicación generalizada. De momento, el uso de algunas de las tecnologías elucidadas en el trabajo o la combinación de ellas podría paliar la contaminación atmosférica, sin afectar al desarrollo de actividad. Se ha observado también que estas alternativas, a priori, se presentarían como viables incluso en escenarios conservadores de la estimación del daño (ej. no considerando los efectos de los nitratos).

El objetivo de esta tesis ha sido ofrecer una serie de análisis, metodologías y datos que apoyen el proceso decisorio cuando se trate de valorar distintas alternativas hacia la solución de un problema asociado, por ejemplo, con los impactos de la generación de energía eléctrica con combustibles fósiles. Es de amplio conocimiento que, bajo un escenario de incertidumbre, muchas veces resulta difícil encontrar metodologías eficaces para valorar las externalidades causadas por la energía. Es en este aspecto donde resaltamos la relevancia de la investigación realizada en esta tesis. El planificador encuentra a su disposición una transparente metodología y un amplio abanico de informaciones que le podría permitir enfocar el estudio de las externalidades sobre, por ejemplo, la salud humana a partir de distintos enfoques que se ajusten a sus preferencias o al juicio de valor que quiera incorporar. El exhaustivo trabajo realizado con los datos requeridos por el UWM, su depuración, análisis y adecuación a la realidad del caso de estudio dejan un buen precedente para aquellos que deseen investigar los impactos producidos por la generación fósil en Sudamérica, sea bajo un enfoque *Bottom-up* o bien *Top-down*. Se ha cumplido de esta manera el objetivo previsto en la medida que el decisor dispone de un amplio relato de datos que le ayude a pautar su flujo decisorio. Se ha creado además una aplicación *Excel* que, combinada con el UWM, permite variar los distintos parámetros estudiados para el contexto sudamericano, según las preferencias del planificador. Es posible por lo tanto variar, por ejemplo, las tasas de incremento de riesgo relativo (IRR), tasas de incidencia, elasticidades renta de la disposición a pagar, o las tasas de descuento, entre otros requisitos, con el único objetivo de ofrecer una metodología transparente y susceptible de calibración según la necesidad y realidad del estudio que se quiera acometer.

Queremos también abogar por la eficacia del UWM como instrumento para medir los daños sobre la salud humana causadas, por ejemplo, por la generación de

energía con combustibles fósiles. Este modelo permite estimar el impacto sobre la salud de una forma transparente y en un contexto limitado de datos. Sin embargo, hemos constatado que el hecho de que maneje pocos datos de entrada no implica que los resultados discrepen con relación a otros modelos.

En líneas generales, esta investigación ha tratado de aportar un breve ensayo sobre las potencialidades que esta metodología puede aportar como herramienta de decisión pública. Esperamos que el decisor público haga uso no solo de la metodología planteada sino también de las informaciones trabajadas en esta investigación, lo que permitiría estudiar con profundidad la realidad de la sostenibilidad de la generación termoeléctrica en Sudamérica y proponer de esta manera alternativas hacia la solución de los diferentes problemas.

## REFERENCIAS

Abbey D.E, Petersen F, Mills P.K, Beeson W.L (1993), *Long-term ambient concentrations of total suspended particulates, ozone and sulfur dioxide and respiratory symptoms in a non-smoking population*. Archives of Environmental Health: An International Journal. Vol. 48: 33-46.

Abbey, D.E, Hwang B.L, Burchette R.J, Vancuren T, Mills, P.K. (1995), *Estimated long-term ambient concentrations of PM<sub>10</sub> and development of respiratory symptoms in a nonsmoking population*. Archives of Environmental Health: An International Journal. Vol. 50, issue 2, 139-152.

Abbey, D.E., Lebowitz M.D., Mills P.K., Petersen F.F., Lawrence Beeson W., & Burchette R.J. (1995b), *Long-term ambient concentrations of particulates and oxidants and development of chronic disease in a cohort of nonsmoking California residents*. Inhalation Toxicology, vol. 7, 19-34.

ABT Associates (2000), *Out of Sight: The Science and Economics of Visibility Impairment*, Report prepared for Clean Air Task Force, Boston, MA (USA). Disponible en: <http://www.catf.us/resources/publications/> (consulta realizada el 29 de mayo de 2012)

AEAT (2005), *Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE: Volume 2: Health Impact Assessment*, February 2005, Didcot, Oxfordshire (UK). Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/archives/cape/pdf/cba\\_methodology\\_vol2.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/cape/pdf/cba_methodology_vol2.pdf) (consulta realizada el 18 de junio de 2011).

AEAT (2005a), *CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020*, Service Contract for Carrying out Cost-Benefit Analysis of Air Quality Related Issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE). Programme, april 2005. [http://www.cafe-cba.org/assets/baseline\\_analysis\\_2000-2020\\_05-05.pdf](http://www.cafe-cba.org/assets/baseline_analysis_2000-2020_05-05.pdf) (consulta realizada el 29 de mayo de 2012)

Agarwal, P., & Frey, H. C. (1995), *Performance Model of the Externally-Fired Combined Cycle (EFCC) System*, Proceedings of the 88th Annual Meeting (held June 18-23 in San Antonio, TX), Air and Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania, June 1995 Paper No. 95-7.02 1995 H.C. Frey.

Altomonte, H., Coviello, M., Lutz, W.F (2003), *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Restricciones y Perspectivas*, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Serie recursos naturales e infraestructura, núm.65, CEPAL, Santiago de Chile.

Álvarez, J.L (2005), *Contabilidad Financiera*, Ediciones Gestión 2000, Barcelona.

Alvim-Ferraz, M.C.M., Pereira, M.C., Ferraz, J. M., Almeida e Mello, A. M. C. & Martins, F.G (2005), *European Directives for Air quality: Analysis of the new limits in comparison with asthmatic Symptoms in children living in the Oporto metropolitan area, Portugal*, Human and Ecological assessment, vol.11. pp. 607-616.

Amat, O. (2005), *Análisis Económico financiero*, Ediciones Gestión 2000, Barcelona.



Andrade, A. (1985), *Características do traço do carvão de Candiota e impactos ambientais*, Tese de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANEEL (2005), *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica, Segunda Edição. Brasília, 2005.

ANP (2002), *Indústria Brasileira de Gás Natural: Histórico Recente da Política de Preços Até dezembro de 2001*. Séries ANP, nº4, Agência Nacional do Petróleo, Rio de Janeiro.

APHEIS (2000), *Air Pollution and Health: a European Information System. Monitoring the Effects of Air Pollution on Health in Europe. Scientific report 1999-2000*. Institut de Veille Sanitaire. Saint-Maurice (France) 2000. Disponible en: <http://www.apheis.org/> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012)

APHEIS (2002), *Air Pollution and Health: A European Information System. Health Impact Assessment of Air Pollution in 26 European Cities. Second Year Report 2000-2001*. Disponible en: <http://www.apheis.org/> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012)

APHEIS (2005), *Air Pollution and Health: A European Information System. Health Impact Assessment of Air Pollution and Communication Strategy. Third-year report*. Institut de Veille Sanitaire. Saint-Maurice (France) 2005. Disponible en <http://www.apheis.org/> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012)

Araújo, J. L (2001), *A questão do investimento no setor elétrico brasileiro: Reforma e crise*. Revista Nova economia, vol. 11, núm. 1, Belo Horizonte.

Azqueta, D (2007), *Introducción a la Economía Ambiental*, Mc Graw Hill, Madrid.

Ball, D.J., Roberts, L.E.J, Simpson, A.C.D. (1994), *An Analysis of Electricity generation Health Risks: A United Kingdom Perspective*, Research report 20, ISBN 1-873933- 60-6, CSERGE, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK.

Barquín, R. (2006), *A sceptical vision of the environmental Kuznets curve: The case of sulfur dioxide*, International Journal of Sustainable Development & World energy, vol.13, pp. 513-524.

Bernow, S., Rowe, R., White, D. Bailly, K. & Goldstein, J. (1995), *New York State Environmental Externalities Cost Study*, Tellus Institute and RCG/Hagler, Bailly, Inc. Empire State Electric Energy Research Corporation, Albany, NY.

Berry, J.E., Holland, M.R., Watkiss, P.R., Boyd, R. & Stephenson, W., (1998). *Power Generation and the Environment—the UK Perspective*, ExternE report. Disponible en: <http://externe.jrc.es> (consulta realizada el 29 de mayo de 2012)

Bleaney, M. F., Binks, M. R., Greenaway, D., Reed, G. & Whynes, D. K. (1992), *What does a university add to its local economy?*, Applied Economics. No. 24. pp. 305-311.

BM&F (2005), *Perguntas Frequentes sobre o mercado de energia elétrica*, Bolsa de Mercadorias & Futuros, São Paulo.

Callan, S.J. & Thomas, J.M. (2004), *Environmental Economics & Management. Theory, Policy, and Applications*, third edition, Thomson-South Western, Ohio.

Carvalho, L.M.V & Oliveira, A.P. (1996), *Determinação da trajetória de nuvens na região de Candiota através da análise de imagens de satélite*, Workshop on Air Pollution and acid rain. The Candiota program. São Paulo.

CBI (1998), *Missing Out: 1998 Absence and Labour turnover survey*, Confederation of British Industry (CBI), London.

CEPAL (2000), *Conciencia ciudadana y contaminación atmosférica: Estado de situación en el área metropolitana de Santiago de Chile*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, LC/R.2022, 14 de agosto de 2000, documento elaborado por Chantal Nicod y Michiko Iizuka, Santiago de Chile.

CEPAL (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), LC/MEX/L.644, 22 de noviembre de 2004, CEPAL, disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/publicaciones/Publicaciones/ext.pdf> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012)

CEPAL (2004), *Fuentes Renovables de energía en América Latina y el Caribe: Situación y propuestas de políticas*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), LC/L. 2132, 19 de mayo 2004, Santiago de Chile

CEPAL (2006), *Fuentes Renovables de energía en América Latina y el Caribe: Dos años después de la conferencia de Bonn*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), documento de proyecto, coord. por Manlio F. Coviello, Santiago de Chile.

CEPAL (2009), *Panorama social de América Latina*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, disponible en [http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/dds/agrupadores\\_xml/aes31.xml&xsl=/a/grupadores\\_xml/agrupa\\_listado.xsl](http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/dds/agrupadores_xml/aes31.xml&xsl=/a/grupadores_xml/agrupa_listado.xsl) (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

CGTEE (2009), *Relatório de administração 2009*, Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), Sistema Eletrobrás. Ministério de minas e energia Governo Federal, Porto Alegre, Brasil, abril de 2010.

CGTEE (2009), *Relatório de sustentabilidade 2009*, Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), Sistema Eletrobrás. Ministério de minas e energia Governo Federal, Porto Alegre, Brasil, Disponible en: <http://www.cgtee.gov.br>. (consulta realizada el 17 de mayo de 2012).

CGTEE (2010), *Relatório de sustentabilidade 2010*, Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), Sistema Eletrobrás. Ministério de minas e energia Governo Federal, Porto Alegre, Brasil, Disponible en: <http://www.cgtee.gov.br>. (consulta realizada el 17 de mayo de 2012).

CIAB (2003), *Meeting with IEA Governing Board*, Coal Industry Advisory Board, Background Paper, Wednesday 10, December 2003.

CIEMAT (1997), *ExternE national implementation*, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Contract JOS3-CT95-0010, final report, December 1997, Spain.

Clasen, H.A.C. (1998), *Ácidos húmicos e fúlvicos do carvão da jazida de Candiota*, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Comisión de las Comunidades Europeas (2001), *Comunicación de la Comisión: El programa Aire puro para Europa, hacia una estrategia temática en pro de la calidad del aire*, Bruselas, 04.05.2001, COM (2001), p. 245, final.

CRM (2009), *Relatório da Diretoria e demonstrações contábeis em 31 de dezembro de 2009 e 2008*. Companhia Rio Grandense de Mineração (CRM). Secretaria de Infraestrutura e logística, Governo do Rio Grande do Sul. Disponible en: [www.crm.rs.gov.br](http://www.crm.rs.gov.br) (consulta realizada el 18 de mayo de 2012).

Czajkowski, M & Ščasný, M. (2010), *Study on benefit transfer in an international setting. How to improve welfare estimates in the case of the countries' income heterogeneity?*, Ecological Economics, Volume 69, Issue 12, 15 October 2010, Pages 2409-2416, ISSN 0921-8009, 10.1016/j.ecolecon.2010.07.008. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800910002740> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

Denardin, V. F. (1997), *Perda de renda em comunidades pesqueiras na região carbonífera do RS*, Dissertação (Mestrado em Economia) IEPE/UFRGS, Porto Alegre (Brasil).

Devra, D., Krupnick, A & Thurstom, G. (2000), *The ancillary health benefits and costs of GHG mitigation: Scope, scale and credibility*, del documento: *Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation*. OECD, New York, 2000, ISBN: 9789264188129, pp. 135-190.

DGEEC (2009), *Anuario Estadístico del Paraguay 2009*, Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos, disponible en: <http://www.dgeec.gov.py/> (Consulta realizada el 13 de junio de 2011).

Duffie J. A. & Beckman W. A. (1980), *Solar engineering of thermal process*. Willey-Interscience. Publication, New York:1,72.

Dusseldorp A, Kruize H, Brunekreef B, Hofschreuder P, de Meer G & van Oudvorst, A.B. (1995), *Associations of PM10 and airborne iron with respiratory health of adults near a steel factory*. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 152, 1932-9.

ECRHS (1996), *European Community Respiratory Health Survey: Variations in the prevalence of respiratory symptoms, self-reported asthma attacks, and use of asthma medication in the European Community Respiratory Health Survey*, European Respiratory Journal; 9: 687-695.

EIA (2009), *International Energy Outlook*, Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting. U.S. Department of Energy, Washington, This publication is on the WEB at: [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html) (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

EPA (1989), *Risk assessment guidance for Superfund: Volume I Human health evaluation manual*, United States Environmental Protection Agency, Report EPA/540/1- 89/002, Dec. 1989, Washington, DC 20460.

EPE (2006), *Plano Nacional de Energia 2030*, Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, disponible en: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

EPE (2011), *Balanço Energético Nacional. Ano base 2010*, Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.

EPRI, *Repowering Existing Fossil Steam Plants*, developed by William C. Stenzel, Dale M. Sopocy & Stanley E. Pace. Disponible en: [http://soapp.epri.com/papers/Repowering\\_Fossil\\_Plants.pdf](http://soapp.epri.com/papers/Repowering_Fossil_Plants.pdf) (consulta realizada el 13 de marzo de 2012).

ERPURS (1997), *Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique et santé; Résultats 1991-1995* (Analysis of short term correlations between air pollution and health: Results 1991-1995). *Evaluation des Risques de la Pollution Urbaine sur la Santé*. Observatoire Régional de Santé d'Ile-de-France, 21-23 rue Miollis, F-75015 Paris.

European Commission (2005), *Externalities of Energy*. Methodology 2005 Update. European Commission. Luxembourg, 2005. Disponible en: <http://www.externe.info> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

Faber, T., Green J., Gual, M., Hass, R., Huber, C., Resch, G., Ruijgrok, W. y Twidell, J. (2001), *Promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries*, 5<sup>th</sup> framework programme of the European Commission, Vienna.

Felisberto, C. R. & Szklo, A. S. (2004), *Proinfa e CDE: Questionamentos sobre a legislação e regulamentação*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FEPAM (1992), *Monitoramento global da fronteira Brasil- Uruguai/Região de Candiota. Sub-projeto: Índice de acidez nos campos hídricos na região de influencia de Candiota. Relatório Interno*, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler, Porto Alegre, Rio Grande do Sul (Brasil).

Fiedler, H. & Solari, J. (1988), *Caracterização do Impacto Ambiental da mina de Candiota sobre as águas superficiais da região*, Congresso Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. Anais, vol. 13, pp. 483-498.

Field, B.C & Field, M.K (2003), *Economía Ambiental*, Mc Graw Hill, 3<sup>a</sup> edición, Madrid 2003.

Fischer, T.K., Lima, D., Rosa, R., Osório, D., & Boing, A. F. (2007), *A mortalidade infantil no brasil: série histórica entre 1994-2004 e associação com indicadores socio-econômicos em municípios de médio e grande porte*. Revista de Medicina, Ribeirão Preto, 2007, vol. 40(4), 559-566.

FMI (2010), *Perspectivas de la economía mundial*, Fondo Monetario Internacional, Washington DC (EEUU), 26 de enero de 2010, disponible en: <http://www.imf.org/external/spanish/pubs/ft/weo/2010/01/pdf/texts.pdf> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012)

Franco, A., & Diaz, A. R. (2009), *The future challenges for clean coal technologies: Joining efficiency increase and pollutant emission control*. Energy, 34(3), 348-354. doi:10.1016/j.energy.2008.09.012.

Friedrich, R & Voss, A. (1993), *External costs of electricity generation*, Energy Policy, Volume 21, Issue 2, February 1993, Pages 114-122, ISSN 0301-4215.

Fritz, K.B.B & Waquil, P.D. (2003), *A percepção da população do município de Candiota sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes da produção e emprego do carvão mineral*. Revista Teoria e Evidência Econômica, Passo Fundo, vol.11, no. 20.

Gomelsky, R. (2003), *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*, serie recursos naturales e infraestructura, nº 55, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). División de Recursos Naturales e Infraestructura, Santiago de Chile, junio de 2003.

Greenpeace (2008), *The true cost of coal, How people and the planet are paying the price for the world's dirtiest fuel*, Amsterdam. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/australia/en/what-we-do/climate/resources/reports/the-true-cost-of-coal/> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

Hawksworth, J. (2006). *The World in 2050. How big will the major emerging market economies get and how can the OECD compete?*. PricewaterhouseCoopers, United Kingdom, march 2006.

Hernández, A. H, Villalobos, A. H & Suárez, A. H (2005), *Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión*, 5ª edición, Thomson, México.

Hohmeyer, O. (1988), *Social Costs of Energy Consumption*, Berlin Springer-Verlag.

IEA (2003), *Coal Industry Advisory Board, Coal & Sustainable Development, Attitudes & Activity*, International Energy Agency, Paris.

IEA (2003), *Control and Minimisation of Coal-fired Power Plant Emissions*, International Energy Agency, Paris (France).

IEA (2007), *Key World Energy Statistics*, International Energy Agency (IEA), Paris, France.

IEA (2008), *World Energy Outlook 2008*, International Energy Agency, Paris, France.

IEA (2010), *Key World Energy Statistics*, International Energy Agency, Paris, France, 2010.

IEA (2011), *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion. Highlights*, 2011 edition, International Energy Agency, Paris, France.

IPCC (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 Energy, Chapter 2: Stationary Combustion*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. ISBN 4-88788-032-4.



ISAAC (1998), *The International Study of Asthma and Allergies in Childhood Steering Committee. Worldwide variations in the prevalence of asthma symptoms: the international study of asthma and allergies in childhood (ISAAC)*. European Respiratory Journal; 12: 315-335.

Karam, H. A., Oliveira, A.P., Soares, J., Carvalho, J.C., Moraes, O.L.L., Degrazia, G.A. & Bornstein, R. (1996), *Simulação numérica da dispersão de SO<sub>2</sub> na região de Candiota com um modelo Lagrangiano*, Workshop on Air Pollution and Acid Rain: The Candiota Program, julho de 1996, Disponible en: [http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/projetos/Candiota/Karan\\_etal\\_1996-Simulacao\\_numerica\\_da\\_dispersao\\_de\\_SO<sub>2</sub>\\_na\\_regiao\\_com\\_um\\_modelo\\_lagrangiano.pdf](http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/projetos/Candiota/Karan_etal_1996-Simulacao_numerica_da_dispersao_de_SO2_na_regiao_com_um_modelo_lagrangiano.pdf) (consulta realizada el 29 de mayo de 2012)

Kim, S.H. (2007), *Evaluation of negative environmental impacts of electricity generation: Neoclassical and Institutional approaches*, Energy Policy, vol. 35, pp. 413-423.

Komatsu, H., Maeda, M. & Muramatsu, M. (2001), *A Large-Capacity Pressurized-Fluidized-Bed-Combustion-Boiler Combined-Cycle Power Plant*, Hitachi Review Vol. 50, no. 3, pp. 105-109.

Krewitt, W., (2002), *External costs of energy-do the answers match the questions? Looking back at 10 years of ExternE*, Energy Policy, vol. 30 (2002), pp. 839–848.

Kristrom, B. & Riera, P. (1996), *Is the Income Elasticity of Environmental Improvements Less Than One?*, Environmental and Resource Economics 7: 45-55, 1996.

Krupnick A & Cropper, M. (1992), *The Effect of Information on Health Risk Valuation*, Journal of Risk and Uncertainty, 5, p. 29-48.

Krupnick, A., Harrison, K., Nickell, E. & Toman, M. (1995), *The Value of Health Benefits from Ambient Air Quality Improvements in Central and Eastern Europe: An Exercise in Benefits Transfer*, Environmental and Resource Economics 7: 307-332, 1996.

Lee, R. (1997), *Externalities studies: Why are the numbers different*, del libro titulado: *Social Costs and sustainability*, Hohmeyer, O., Ottinger, R.L. & Rennings, K. (Eds), Springer, Berlin, 1997, ISBN 3-540-60177-5.

Linares L.P. (2002), *Externalidades de la energía y su valoración*, Del libro titulado: *Energía, fiscalidad y medio ambiente en España*. Gago, A. y Labandeira, X. (Eds). Instituto de Estudios Fiscales, Madrid (ISBN 84-8008-111-2).

Lutz, W. F. (2001), *Reformas del sector energético, desafíos regulatorios y desarrollo sustentable en Europa y América Latina*. Proyecto CEPAL/Comisión Europea *Promoción del uso eficiente de la energía en América Latina*, Serie recursos naturales e infraestructura, núm. 26, CEPAL, Santiago de Chile.

Macedo, S.E.C (2007), *Fatores de risco para a asma em adultos, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil*, Caderno Saúde Pública, Rio de Janeiro, vol. 23 (4): 863-874.

Markandya, A & Boyd, R (2000), *Economic valuation of environmental impacts and external costs*. Prepared for: IAEA Regional Training Course on Use of Agency

Methodologies and Tools To Analyse Priority Environmental Issues, Jakarta, Indonesia, 8 May - 2 June, 2000.

Markandya, A, Hudson, L. & Taylor, T. (2002), *Valuing the Human Health Effects of Routine Atmospheric Releases from Nuclear Facilities*, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.

Markandya, A. (1998), *The valuation of health impacts in developing countries*, Revista Planejamento e Políticas Públicas, nº18, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), Brasília, Dezembro de 1998.

Marten, A.L & Newbold, S. C. (2011). *Estimating the Social Cost of Non-CO<sub>2</sub> GHG Emissions: Methane and Nitrous Oxide*. U.S. Environmental Protection Agency. National Center for Environmental Economics. 11-01 January, 2011. Washington, DC.

Martins, A. F. & Zanella, R. (1988), *Análise de águas de superfície e de profundidade da região de Candiota, RS, determinação da concentração de elementos traços de relevância ambiental, elementos menores e macroelementos*. Congresso Brasileiro de Geoquímica, anais, Porto Alegre, Vol. 1 (2): 217-223.

MME (2000), *Metodologia de Valoração das Externalidades Ambientais da Geração Hidrelétrica e Termelétrica com Vistas à sua Incorporação no Planejamento de Longo Prazo do Setor Elétrico*, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.

Navrud S. (2004), *Value transfer and environmental policy*, in T. Tietenberg and H. Folmer (eds), *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 2004/2005: a survey of current issues*. London: Edgar Elgar Publishers.

Nedel, A. & Alves, R.C.M (2003), *Aplicação de um modelo de dispersão atmosférico na região de Candiota-RS e sua relação com as condições meteorológicas*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, CEPSSRM/UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2003.

NEEDS (2007), *A set of concentration-response functions*, New Energy Externalities Developments for Sustainability, Deliverable nº 3.7 – RS1b/WP3, 28 February 2007. Disponible en: <http://www.needs-project.org> (Consulta realizada el 29 de mayo de 2012)

NEEDS (2008), *Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of advanced fossil power generation systems*, New Energy Externalities Developments for Sustainability Deliverable nº 7.2 - RS 1a, 31. March 2008. Disponible en: <http://www.needs-project.org> (Consulta realizada el 29 de mayo de 2012).

NEEDS (2009), *Cost-benefit analysis – Review of the Methodology and Practical Step-By-Step Guidelines for Applications in the Energy Sector*, New Energy Externalities Developments for Sustainability, Deliverable 4.1 - RS 3a, August 2009. Disponible en: <http://www.needs-project.org> (Consulta realizada el 29 de mayo de 2012).

NEEDS (2009a), *External costs from emerging electricity generation technologies*, New Energy Externalities Developments for Sustainability, Deliverable nº 6.1 – RS1a, 24. March 2009. Disponible en: <http://www.needs-project.org> (consulta realizada el 29 de mayo de 2012).

Netten, A. & Curtis, L. (2000), *Unit costs of Health and Social Care 2000*. Personal Social Services Research Unit (PSSRU). <http://www.pssru.ac.uk/index.htm> (consulta realizada el 21 de Julio de 2011).

Nicholson K.W. (1988), *The dry deposition of small particles: a review of experimental measurements*. Atmospheric Environment, 1988;22:2653–66

Nogueira, L.A.H (2005), *Perspectivas de Sostenibilidad energética en los países de la Comunidad Andina*, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Serie recursos naturales e infraestructura, núm. 83, CEPAL, Santiago de Chile.

Oliveira, J.A. et ál. (1982), *Lesões dentárias em bovinos e ovinos causadas pela poluição ambiental na região de Candiota, RS*. In: Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Médicos. Veterinários. Camboriú, p.295.

Ontario Hydro (1993), *Full-Cost Accounting for Decision Making*, Task Force on Sustainable Energy Development, Survey Team #4, Toronto, Canada.

ORNL/RFF (1994), *Estimating Externalities of the Coal Fuel Cycle*, Report 3 on the external costs and benefits of fuel cycles. A study by the US Department of Energy and the Commission of the European Communities. Prepared by Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future. McGraw Hill.

ORNL/RFF (1994a), *External Costs and Benefits of Fuel Cycles*, prepared by Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Edited by Russell Lee, ORNL, Oak Ridge, TN, USA 37831.

Ortiz, R. A., Hunt, A., Seroa da Motta, R., & MacKnight, V. (2011). *Morbidity costs associated with ambient air pollution exposure in Sao Paulo, Brazil*. Atmospheric Pollution Research, 2(4), 520-529. doi:10.5094/APR.2011.059.

Ostro B.D. & Rothschild S. (1989), *Air pollution and acute respiratory morbidity: An observational study of multiple pollutants*. Environmental Research, 50, 238-247

Ostro B.D. (1987), *Air pollution and morbidity revisited: A specification test*, Journal of Environmental Economics and Management, 14, 87-98.

Ottinger, R.L., Wooley, D.R., Robinson, N.A., Hodas, D.R., Babb, S.E. (1991), *Environmental Costs of Energy*, prepared by Pace University Center for Environmental Legal Studies, New York: Oceana Publications.

Parkhurst, W.J., Tanner, R.L., Weatherford, F.P., Valente, R.J. & Meagher, J. F. (1999). *Historic PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> concentrations in the southeastern United States: Potential implications of the revised particulate matter standard*. Journal of the Air & Waste Management Association, 49(9), 1060-1067. Air & Waste Management Association. Retrieved from: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1967739> (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

Pasquill, F. (1961), *The estimation of the dispersion of windborne material*, The Meteorological Magazine, vol 90, No. 1063, pp 33-49.



Paz, R. S. Marques A. R. C. (2007), *Utilização de modelagem numérica para o estudo da dispersão de poluentes emitidos pela usina termoeletrica Presidente Médici*, Revista Química Nova, Vol. 30, No. 7, pp. 1609- 1615.

Pearce, D., & Moran, D. (1994), *The Economic Value of Biodiversity*. IUCN – Earthscan.

Pearce, D.W. (1995), *Development of Externality Adders in the UK*, Presentation at the workshop on External Cost of Energy, organized by EC, IEA and OECD, 30-31 January, 1995, Bruxelles, Belgium.

Pearce, D.W., Bann, C. & Georgiou, S. (1992), *The Social Costs of Fuel Cycles*, Report for the UK Department of Trade and Industry, CSERGE, University College of London.

Pedrosa, L, Sarinho, S.W. & Ordonha, M. (2006), *Causas básicas de las muertes neonatales en Brasil: Conocer para prevenir*, Revista Cubana Pediatría 2006; 78 (4).

Pereira, T.R., Simões, A. & Carvalhal, A. (2011), *Mensurando o resultado fiscal das operações de empréstimo do tesouro ao BNDES: custo ou ganho líquido esperado para a União?*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, ISSN 1415-4765.

Pinhel, A.C.C. (2000), *Simulação de uma usina térmica a gás no novo contexto do setor elétrico brasileiro: Uma análise Risco X Retorno*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Pires Ojeda, D. (2005), *Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro*, UFRJ – COPPE, Rio de Janeiro.

Pires, M., Querol, X. & Teixeira E.C. (2001), *Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas*, Revista Geochimica Brasiliensis 15 (1/2): pp. 113-130, 2001.

Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J. Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K. & Thurston, G.D. (2002), *Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution* JAMA The Journal of the American Medical Association, vol. 287(9), 1132-1141.

POST (2005), *Cleaner Coal*, Postnote nº. 2533, December 2005, Parliamentary Office of Science and Technology (POST), United Kingdom 2005.

Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C.R., Artiñano, B., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Buringh, E., ten Brink, H.M., Lutz, M., Bruckmann, P., Straehl, P. & Schneider, J. (2008), *Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities*, Atmospheric Environment, Volume 38, Issue 38, December 2004, Pages 6547-6555, ISSN 1352-2310, 10.1016/j.atmosenv.2004.08.037.

Rabl A. (2003), *Interpretation of Air Pollution Mortality: Number of Deaths or Years of Life Lost?* Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.53(1), 41-50 (2003).

Rabl A. 2001(a), *Mortality due to Air Pollution: How to Interpret the Results*. Proceedings of Environmental Health Risk 2001, Cardiff, UK, 10-12 Sept. p.53-62.

Rabl, A. & Spadaro, J.V. (1999), *An analysis of the uncertainties of damages and costs of air pollution*, Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris.

Rabl, A. (2001), *Reference Database of Concentration-Response Functions for Health Impacts of Air Pollution*. Ecole des Mines de Paris. 31 December 2001

RCG/Tellus (1995), *New York State Environmental Externalities Cost Study*, Final Reports EP 91-50, Reports 1-4. Prepared for the Empire State Electric Energy Research Corporation, Albany, New York, RCG, Hagler, Bailly, Inc., Tellus Institute.

Ready, R & Navrud S. (2006), *International benefit transfer: Methods and validity tests*, Ecological economics, Volume 60, Issue 2, 1 December 2006, Pages 429–434.

Ready, R., Navrud, S., Day, B., Dubourg, R., Machado, F., Mourato, S., Spanninks F., & Rodriguez, M.X.V (2004), *Benefit Transfer in Europe: How Reliable Are Transfers Across Countries?*, Environmental & Resource Economics, 29, p: 67-82.

Rótulo D. (2006), *Cooperação política Brasil- Uruguai e agenda pública no Brasil na etapa da pré-negociação de acordos internacionais – O caso dos acordos pela poluição transfronteiriça produzida pela termelétrica de Candiota*, Documento de Trabajo no 25, Facultad de Administración y Ciencias Sociales, Universidad ORT Uruguay.

Rowe R., Lang, C., Chestnut, L., Latimer, D., Rae, D., Bernow, S., White, D. (1995), *The New York Externality Study*, Oceana Publications, Dobbs Ferry, NY, USA.

Saez, M., Pérez-Hoyos, S., Tobias, A., Saurina, C., Barceló, M.A. & Ballester, F. (1999), *Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica*, Revista Española Salud Pública, 1999; 73:133-143.

Sala, J.F. (1999), *Valoração dos Custos Ambientais Relacionados à Saúde - Estudo de Caso: Setor Transportes da Cidade de São Paulo*, Tese de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ.

Schleisner, L. (2000), *Comparison of methodologies for externality assessment*, Energy Policy, vol. 28 (2000), pp. 1127-1136.

Sehmel G. (1980), *Particle and gas dry deposition: a review*. Atmospheric Environment, 1980; 14:983.

Seinfeld J.H. & Pandis, S.N. (1998), *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, New York: JohnWiley and Sons; 1998.

Seoanez, C. M. (2002), *Tratado de la contaminación atmosférica*, Mundi-Prensa, Madrid.

Serôa da Motta, R. & Mendes (1994), *Perdas e serviços ambientais do recurso água para uso doméstico no Brasil*, Pesquisa e Planejamento econômico. Vol. 24, no.1.

Serôa da Motta, R. (1998), *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*, Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Brasília.

Serôa da Motta, R., Arigoni Ortiz, R. & de Freitas Ferreira, S. (2000), *Health and economic values for mortality and morbidity cases associated with air pollution in Brazil*, del libro: *Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation*. OECD, New York, 2000, ISBN: 9789264188129, pp. 263-274.

Spadaro, J.V. (1999), *Quantifying the Damages of Airborne Pollution: Impact Models, Sensitivity Analyses and Applications*, Ph.D. Dissertation, Centre d'Energétique, Ecole des Mines, 60 boul. St.Michel, F-75272, Paris, Cedex 06, France.

Spadaro, J.V. (2003), *Environmental Pollution and Human Health: Applications of the RiskPoll software*, unpublished report, June 2003.

Spadaro, J. V. & Rabl, A. (2008), *Estimating the uncertainty of damage costs of pollution: A simple transparent method and typical results*. Environmental Impact Assessment Review, 28 (2-3), 166-183. doi:10.1016/j.eiar.2007.04.001.

Spadaro, J.V. (2011), *The Uniform World Model: A Methodology for Predicting the Health Impacts of Air Pollution*, BC3 Working paper series 2011-12, December 2011.

Speranza, A.M., Orazi, V., Manfredi, L. & Sarasqueta, P. (2005), *Programa Nacional de Infecciones Respiratorias Agudas Bajas. Hospitalización abreviada: Un modelo de atención basado en evidencias altamente efectivo para disminuir la mortalidad infantil*, Arch. argent. pediatr. v.103 n.3 Buenos Aires mayo/jun. 2005

Spix C., Anderson H.R., Schwartz, J., Vigoti, M.A., Le Tertre, A., Vonk, J.M, Touloumi, G., Balducci, F., Piekarski, T., Bacharova, L., Tobias, A., Pönkä, A., & Katsouyanni K. (1998). *Short term effects of air pollution on hospital admissions for respiratory diseases in Europe: a quantitative summary of APHEA study results*. Archives of Environmental Health, 53, 54-64.

Takahashi, M. (1998). *Technologies for Reducing Emissions in Coal-Fired Power Plants*. World Bank. Energy Issues, nº 14, August 1998. Disponible en: [http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2003/08/19/000090341\\_20030819145119/Rendered/PDF/263480Energy0issues0no1014.pdf](http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2003/08/19/000090341_20030819145119/Rendered/PDF/263480Energy0issues0no1014.pdf) (consulta realizada el 23 de mayo de 2012).

Van Den Berg, C. (1995), *Power plants with pressurized fluidized-bed combustion*, Fuel and Energy Abstracts, Vol. 36, no. 5, pp. 356-356.

Van Ulden, A.P. & Holtslag, A.A.M. (1995), *Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 24.

Viscusi, W.K., Magat, W.A. & Huber, J. (1991), *Pricing Environmental Health Risks: Survey Assessments of Risk-Risk and Risk-Dollar Tradeoffs for Chronic Bronchitis*. Journal of Environmental Economics and Management, 21(1), p. 32-51.

Vrhovcak, M.B., Tomsic, Z., Debrecin, N. (2005), *External costs of electricity production: case study Croatia*, Energy Policy, vol. 33 (2005), pp. 1385–1395.

WCI (2005), *The Coal Resource*, World Coal Institute London. Disponible en: [http://www.worldcoal.org/assets\\_cm/files/PDF/thecoalresource.pdf](http://www.worldcoal.org/assets_cm/files/PDF/thecoalresource.pdf). (consulta realizada el 14 de enero de 2012).

WEC (2007), *Energy and climate Change*, World Energy Council, Londo, 2007.

WEC (2008), *World Energy Outlook 2008*. World Energy Council, London, 2008.

Woodruff T.J, Grillo J. & Schoendorf K.C. (1997), *The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States*. Environmental Health Perspectives 1997, 105: 608-612.

Yao, Q., Li, S.Q., Xu, H.W., Zhuo, J.K., & Song, Q. (2009). *Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: A review*. Energy, 34(9), 1296-1309. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.energy.2009.03.013.

Zannetti, P. (1990), *Air Pollution Modeling. Theories, Computational Methods and Available Software*, Van Nostrand-Reinhold.

Zhang, Q, Weili, T, Yumei, W & Yingxu, C. (2007), *External costs from electricity generation of China up to 2030 in energy and abatement scenarios*, Energy Policy, vol. 35 (2007), pp. 4295–4304.

Zhao, Y., Wang, S., Duan, L., Lei, Y., Cao, P.& Hao, J. (2008), *Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction*, Atmospheric Environment, Volume 42, Issue 36, November 2008, Pages 8442-8452, ISSN 1352-2310.

Zhao, Y., Wang, S., Nielsen, C.P Li, X. & Hao, J. (2010), *Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants*, Atmospheric Environment, Volume 44, Issue 12, April 2010, Pages 1515-1523, ISSN 1352-2310,

### Anexo 1: CRF utilizadas en el caso de estudio

CRF	IRR	IL casos por persona por año	f <sub>POP</sub> %	S <sub>CRF</sub>	Comentarios
<b>Mortalidad infantil (IF)</b>	<b>0,40 %</b> por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$  Fuente: ExternE (2005)& Woodruff et ál. (1997)	<b>0,0023</b>  Muertes de niños < 1 año	<b>3%</b>	<b><math>2,68 \times 10^{-9}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	17,2% mortalidad infantil por causas respiratorias $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Mortalidad crónica (CM)</b>	<b>0,6 %</b> por $\mu\text{gPM}_{2,5}/\text{m}^3$  Fuente: AEAT, (AEAT, 2005a) y NEEDS (NEEDS, 2007)	Véase Capítulo cuatro	<b>46%</b> adultos > 30 años valor medio: Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay	<b><math>3,76 \times 10^{-4}</math></b> YOLL anuales por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Valor medio de los YOLL (>30 años): 16  $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$  Obs. Para convertir la $S_{\text{CRF}}$ para $\text{PM}_{10}$ hay que multiplicar la pendiente encontrada para las partículas finas por 0,6
<b>Bronquitis crónica (CB)</b>	<b>0,70%</b> por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$  Fuente: Abbey et ál. (1995b)	<b>0,00378</b> nuevos casos de CB por año por persona.  Fuente: European Comission, 2005 Abbey et ál. (1993, 1995)	<b>57%</b> adultos > 27 años	<b><math>1,46 \times 10^{-5}</math></b> nuevos casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	$S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Días de trabajo perdidos (WDL)</b>	<b>0,46%</b> por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$  Fuente: Ostro (1987)	<b>4,5</b> Días de trabajo perdidos Fuente: AEAT(2005)	<b>68%</b> Adultos entre 15-64 años	<b><math>1,40 \times 10^{-2}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	$S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Días de actividad restringida (RAD)</b>	<b>0,475%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$  Fuente: Ostro (1987)	<b>19</b> RAD por persona por año Fuente: ORNL/RFF(1994)	<b>68%</b> Adultos entre 15-64 años	<b><math>6,483 \times 10^{-2}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Obs. Para convertir la $S_{\text{CRF}}$ para $\text{PM}_{10}$ hay que multiplicar la pendiente encontrada para las partículas finas por 0,6  $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$

<b>Días de actividad restringida menor (mRAD)</b>	<b>0,74%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2.5}$ <i>Fuente: Ostro &amp; Rothschild (1989)</i>	<b>7,8</b> mRAD por persona por año <i>Fuente: Ostro &amp; Rothschild (1989)</i>	<b>58%</b> Adultos entre 18-64 años	<b><math>2,06 \times 10^{-2}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Obs. Para convertir la $S_{\text{CRF}}$ para $\text{PM}_{10}$ hay que multiplicar la pendiente encontrada para las partículas finas por 0,6 $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Días de actividad restringida neta (netRAD)</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b><math>2,61 \times 10^{-3}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Para encontrar la $S_{\text{ERF}}$ de los <b>netRAD</b> <sup>222</sup> es preciso restar del monto total del <b>RAD</b> los <b>WDL</b> y el <b>mRAD</b>  Obs. Para convertir la $S_{\text{CRF}}$ para $\text{PM}_{10}$ hay que multiplicar la pendiente encontrada para las partículas finas por 0,6 $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)</b>	<b>0,114%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: APHEIS(2005)</i>	<b>0,00617</b> Casos por habitante/año <i>Fuente: APHEIS(2005)</i>	<b>100%</b> Toda la población	<b><math>7,03 \times 10^{-6}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	$S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)</b>	<b>0,06%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: APHEIS(2005)</i>	<b>0,00723</b> casos por habitante/año <i>Fuente: APHEIS(2005)</i>	<b>100%</b> Toda la población	<b><math>4,34 \times 10^{-6}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	$S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$
<b>Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa) Adultos</b>	<b>0,182%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: ExternE. (European Commission, 2005) &amp; Rabl (2001)</i>	<b>91</b> casos por persona por año	<b>21%</b> adultos > 15 años (población adulta que presenta síntomas respiratorios crónicos – prevalencia de un 30%-)	<b><math>3,59 \times 10^{-2}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	LRS: Prevalencia de un 30% : adultos > 15 años <i>Fuente: AEAT(2005)</i> $S_{\text{CRF}}^{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times S_{\text{CRFPM10}}$

<sup>222</sup> netRAD= RAD – WDL – mRAD

<b>Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos</b>	<b>0,223%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: Rabl (2001)</i>	<b>28</b> casos por persona por año	<b>3%</b> <i>Población adulta asmática (prevalencia de asma: 4,5%)</i>	<b><math>2,03 \times 10^{-3}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	BDUa: prevalencia de asma de un 4,5% sobre la población adulta  $\text{SCRF}_{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times \text{SCRFPM}_{10}$
<b>Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos</b>	<b>0,325%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: Rabl (2001)</i>	<b>30</b> casos por persona por año  <i>Fuente: Rabl (2001)</i>	<b>2%</b> <i>población infantil entre 5-14 asmática: prevalencia 11,54% (promedio Brasil, Uruguay, Paraguay, Argentina)</i>	<b><math>1,89 \times 10^{-3}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Prevalencia niños asmáticos entre 5-14 años (ISAAC, 1998) Véase tabla 3.18.  $\text{SCRF}_{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times \text{SCRFPM}_{10}$
<b>Uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos</b>	<b>0,23%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{10}$ <i>Fuente: Rabl (2001)</i>	<b>34</b> casos por persona por año  <i>Fuente: Rabl (2001)</i>	<b>2%</b> <i>población infantil entre 5-14 asmática: prevalencia 11,54% (promedio Brasil, Uruguay, Paraguay, Argentina)</i>	<b><math>1,51 \times 10^{-3}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	Prevalencia niños asmáticos entre 5-14 años (ISAAC, 1998)  $\text{SCRF}_{\text{sulfates;nitratos}} = 1,67 \times \text{SCRFPM}_{10}$
<b>Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA) <math>\text{SO}_2</math></b>	<b>0,04%</b> por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{SO}_2$  <i>Fuente: Rabl(2001)</i>	<b>0,00617</b> Casos por habitante/año  <i>Fuente: APHEIS(2005)</i>	<b>100%</b> <i>Toda la población</i>	<b><math>2,47 \times 10^{-6}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$	La CRF es establecida para toda la población
<b>Mortalidad aguda (AM) <math>\text{SO}_2</math></b>	<b>0,046%</b> por $\text{mgSO}_2/\text{m}^3$  <i>Fuente: Rabl(2001)</i>	<b>0,007</b> muertes por habitante/año	<b>100%</b> <i>Toda la población</i>	<b><math>1,62 \times 10^{-6}</math></b> casos por año por persona por $\mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$	La CRF es establecida para toda la población

## Anexo 2: Costes unitarios (UC) para el caso de estudio







ERF	UC Valor de referencia	Fuente	UC Caso de estudio adaptado según el PPPGDP per cápita US\$ (2009)	Comentarios
Mortalidad infantil (IF)	$UC = \frac{1.000.000€}{(VSL\ UE) \times 1,5} = \frac{(MRS)}{(2004)} = 1.500.000€$	<p>Proyecto ExternE</p> <p>European Commission (2005, pp. 44, 147)</p>	928.862	<p>El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación:</p> $UC_{UE2009} = 1.500.000€ \times (1 + 0,85 \times 3\%)^5 = 1.701.256€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ <p>Para transferir el valor de arriba (1.701.256€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación:</p> $1.701.256€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 928.862 \text{ (2009)}$
<p>Mortalidad crónica (CM)</p> <p>Mortalidad aguda (AM)</p>	$50.000 € \text{ (VOLY UE)} \text{ (2004)}$	<p>Proyecto ExternE</p> <p>European Commission (2005, pp. 44, 147)</p>	30.962	<p>El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación:</p> $UC_{UE2009} = 50.000€ \times (1 + 0,85 \times 3\%)^5 = 56.709€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ <p>Para transferir el valor de arriba (56.709€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación:</p> $56.709€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 30.962 \text{ (2009)}$
Bronquitis crónica (CB)	$200.000 € \text{ (2004)}$	<p>Proyecto ExternE</p> <p>European Commission, (2005, pp. 156);</p> <p>Krupnick &amp; Cropper (1992)</p>	123.848	<p>El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación:</p> $UC_{UE2009} = 200.000€ \times (1 + 0,85 \times 3\%)^5 = 226.834€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ <p>Para transferir el valor de arriba (226.834€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación:</p> $226.834€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 123.848 \text{ (2009)}$



<i>Días de trabajo perdidos (WDL)</i>	<b>253 € (2004)</b>	Proyecto ExternE  European Comission, (2005, pp.152);  CBI (1998)	<b>157</b>	El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación: $UC_{UE2009} = 253€ \times (1+0,85 \times 3\%)^5 = 287€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ Para transferir el valor de arriba (287€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación: $287€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 157 \text{ (2009)}$
<i>Días de actividad restringida (RAD)</i>  <i>Días de actividad restringida neta (netRAD)</i>	<b>137 € (2003)</b>	Proyecto ExternE European Comission, (2005, pp.154);  Ready <i>et ál.</i> (2004)	<b>87</b>	El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación: $UC_{UE2009} = 137€ \times (1+0,85 \times 3\%)^6 = 159€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ Para transferir el valor de arriba (159€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación: $159€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 87 \text{ (2009)}$
<i>Días de Actividad restringida menor (mRAD)</i>	<b>41 € (2003)</b>	Proyecto ExternE  European Comission, (2005, pp.156);  Ready <i>et ál.</i> (2004)	<b>26</b>	El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación: $UC_{UE2009} = 41€ \times (1+0,85 \times 3\%)^6 = 48€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ Para transferir el valor de arriba (48€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación: $48€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 26 \text{ (2009)}$
<i>Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)</i>  <i>Ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares (CHA)</i>	<b>2.141 € (2003)</b>	Proyecto ExternE European Comission, (2005, pp.153);  Ready <i>et ál.</i> (2004)	<b>1.360</b>	El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación: $UC_{UE2009} = 2.141€ \times (1+0,85 \times 3\%)^6 = 2.490€ \text{ (UC}_{UE2009}\text{)}$ Para transferir el valor de arriba (2.490€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación: $2.490€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\$ 1.360 \text{ (2009)}$

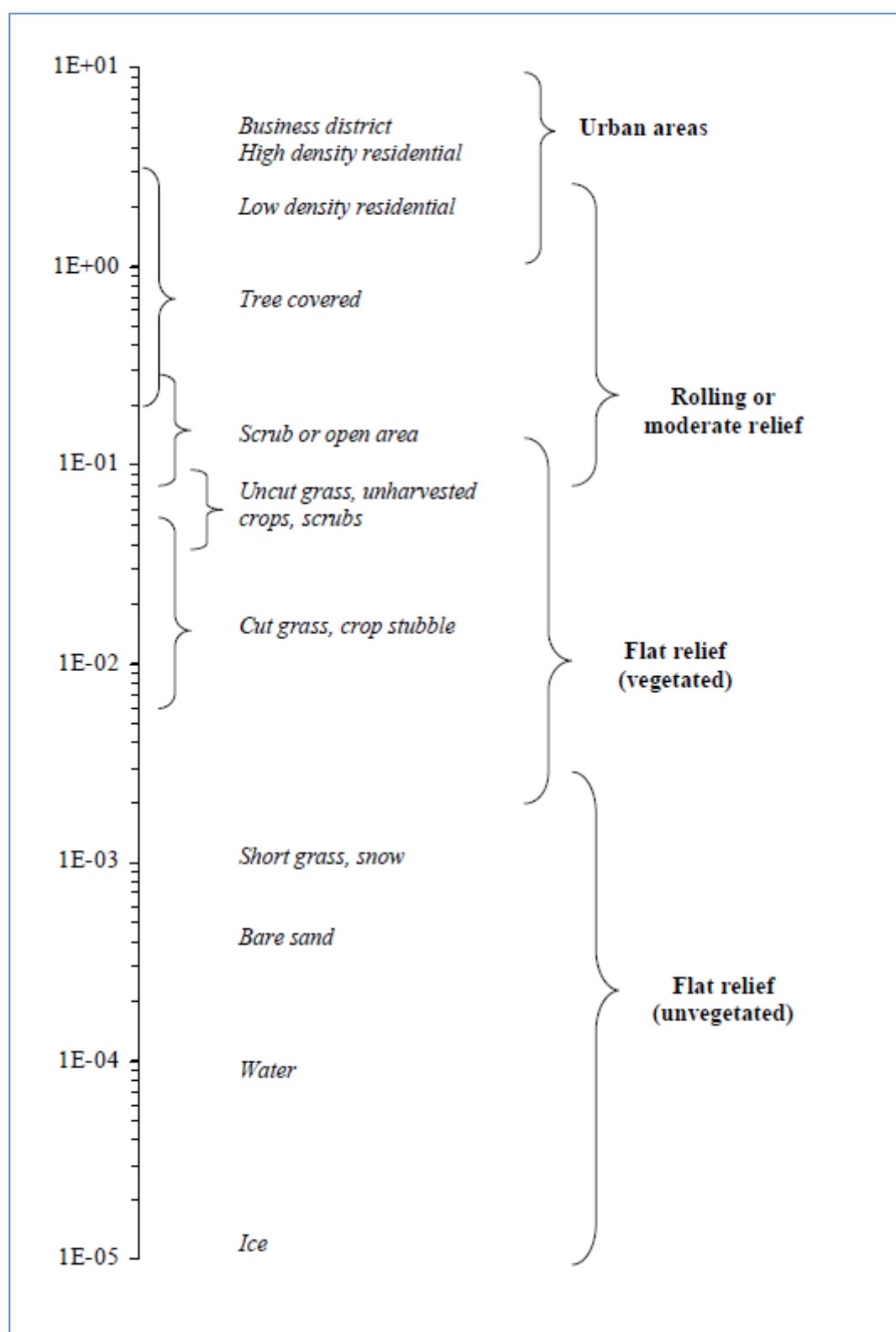
<p><i>Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSa), adultos</i></p> <p><i>Síntomas del tracto respiratorio inferior (LRSc), niños asmáticos</i></p>	<p><b>38 €</b></p> <p><b>(2003)</b></p>	<p>Proyecto ExternE European Comission, (2005, pp. 154);</p> <p>Netten &amp; Curtis (2000)</p>	<p><b>24</b></p>	<p>El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación:  <math display="block">UC_{UE2009} = 38€ \times (1+0,85 \times 3\%)^6 = 44€ (UC_{UE2009})</math></p> <p>Para transferir el valor de arriba (44€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación:  <math display="block">44€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\\$ 24(2009)</math></p>
<p><i>Uso de broncodilatadores (BDUa), adultos asmáticos</i></p> <p><i>Uso de broncodilatadores (BDUc), niños asmáticos</i></p>	<p><b>1€</b></p> <p><b>(2004)</b></p>	<p>Proyecto ExternE European Comission, (2005, pp.154)</p>	<p><b>0,60</b></p>	<p>El valor ha sido actualizado a euros del 2009 aplicando la siguiente ecuación:  <math display="block">UC_{UE2009} = 1€ \times (1+0,85 \times 3\%)^5 = 1,2€ (UC_{UE2009})</math></p> <p>Para transferir el valor de arriba (1,2€) para el contexto del caso de estudio se aplicó la siguiente relación:  <math display="block">1,2€ \times 0,38 \text{ (factor de ajuste PPPGNP caso de estudio)} \times 1,44 \text{ (tipo de cambio euros a Dólares)} = US\\$ 0,6 (2009)</math></p>

### Anexo 3: Escala de clasificación del carbón

RANGO			Cfijo (%)	Humedad ( %)	Materia volátil ( %)	Poder calorífico (MJ/kg)
Antracita			86 - 98	< 3	< 5	23 -33
Bituminoso (Hulla)(bajo, medio y alto en volátiles)			45 - 86	5 - 10	10 - 30	24-35
Sub-bituminoso			35 - 45	15 - 30	30 - 40	20-21
Lignito			25 - 42	40 - 60	40 - 50	10-20
Turba			< 25			

Fuente: [www.oviedo.es](http://www.oviedo.es/personales/carbon/carbon_mineral/carbon%20mineral.htm) (http://www.oviedo.es/personales/carbon/carbon\_mineral/carbon%20mineral.htm). Consulta realizada el 26 de octubre de 2008

#### Anexo 4: Longitud de rugosidad



**Anexo 5:** *Distribución de frecuencia de los vientos según su dirección y velocidad (caso de estudio)*

Direcciones / Tipos de vientos	1 a 4 m/s	4 a 7 m/s	7 a 11 m/s	11 a 17 m/s	17 - 21 m/s	>= 22	Total (%)
348,75 - 11,25	9,6	2,6	1,5	1,1	0,3	0,0	15,2
11,25 - 33,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
33,75 - 56,25	4,7	2,9	1,1	0,5	0,1	0,0	9,4
56,25 - 78,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
78,75 - 101,25	9,9	9,6	3,5	0,7	0,1	0,0	23,8
101,25 - 123,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
123,75 - 146,25	8,7	9,1	4,4	0,7	0,1	0,0	22,9
146,25 - 168,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
168,75 - 191,25	2,3	1,8	0,6	0,1	0,0	0,0	4,9
191,25 - 213,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
213,75 - 236,25	3,5	1,8	0,6	0,2	0,0	0,0	6,1
236,25 - 258,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
258,75 - 281,25	5,0	2,5	0,8	0,1	0,0	0,0	8,4
281,25 - 303,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
303,75 - 326,25	3,4	2,6	1,2	0,6	0,0	0,0	7,8
326,25 - 348,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subtotal	47,1	33,0	13,8	4,0	0,7	0,0	98,6
Calmos							1,4
<b>Total</b>							<b>100</b>

### Anexo 6: CRF para mortalidad crónica (Argentina)

Grupo de edad	Población <sup>(a)</sup>	f <sub>pop</sub>	LE <sup>(b)</sup> (años)	Índ. mort <sup>(c)</sup>	nº muertes <sup>(d)</sup>	Años vida perdidos x muertes	CRF (anual YOLL por [persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup> ])	CRF nº muertes/ persona.µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
30-34	2.366.529	7,68%	47,5	0,00118	2.825	134.187,50	2,02E-04	4,25E-06
35-39	2.058.984	6,68%	42,8	0,00163	3.349	143.337,20	2,51E-04	5,87E-06
40-44	1.790.435	5,81%	38,1	0,00232	4.212	160.477,20	3,18E-04	8,35E-06
45-49	1.707.020	5,54%	33,6	0,00358	6.139	206.270,40	4,33E-04	1,29E-05
50-54	1.593.771	5,17%	29,1	0,00591	9.366	272.550,60	6,19E-04	2,13E-05
55-59	1.460.496	4,74%	24,9	0,00906	13.324	331.767,60	8,12E-04	3,26E-05
60-64	1.283.450	4,17%	20,9	0,0138	17.203	359.542,70	1,04E-03	4,97E-05
65-69	1.033.493	3,35%	17,3	0,02011	20.946	362.365,80	1,25E-03	7,24E-05
70-74	822.713	2,67%	13,8	0,02929	25.053	345.731,40	1,46E-03	1,05E-04
75-79	655.692	2,13%	10,6	0,04655	31.859	337.705,40	1,78E-03	1,68E-04
80-84	470.165	1,53%	7,8	0,0832	36.403	283.943,40	2,34E-03	3,00E-04
85-89	251.007	0,81%	5,5	0,14121	35.445	194.945,84	2,80E-03	5,08E-04
90-94	87.080	0,28%	3,8	0,22816	19.868	75.499,06	3,12E-03	8,21E-04
95-99	20.055	0,07%	2,7	0,35091	7.038	19.001,25	3,41E-03	1,26E-03
100 -	2.900	0,01%	2,0	0,51037	1.480	2.960,15	3,67E-03	1,84E-03
<b>Total</b>	<b>30.808.257</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>250.943</b>	<b>4.327.219</b>	<b>7,44E-04</b> (promedio >30 años)	<b>5,42E-05</b> (promedio >30 años)

(a) Fuente: INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2010). El dato abarca la población de las provincias argentinas incluidas en la zona de impacto: Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Córdoba, Corrientes, Chaco, Entre Ríos, Formosa, Misiones, Santa Fe y Santiago del Estero.

(b) LE: Expectativa de vida. Fuente: WHO (World Health Organization. Life tables for WHO Member States. Argentina) – 2009-

Disponible en [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(c) Índ. Mort= Índice de mortalidad. Es la cantidad de muertes por grupo de edad por año, dividido por la población perteneciente a ese grupo de edad.

Fuente: WHO Life tables for WHO Member States. Disponible en [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(d) Fuente: Secretaría de políticas, regulación e institutos. Dirección de estadísticas e información de salud. Sistema estadístico de salud. Estadísticas vitales. Información básica, 2009, serie 5, número 53. ISSN 1668-9054.

Nota: En las estadísticas de mortalidad a partir de fuentes oficiales argentinas, el número de muertes está desglosado hasta 85 años (85 y más). De esta forma, para encontrar el número de muertes de las franjas a partir de 85 años se utilizó la tasa de mortalidad de la OMS multiplicado por la población perteneciente a estas franjas.

(e) YOLL/Receptor durante tiempo de vida (TV) cuando es expuesto a una concentración C.

### Anexo 7: CRF para mortalidad crónica (Uruguay)

Grupo de edad	Población <sup>(a)</sup>	f <sub>pop</sub>	LE <sup>(b)</sup> (años)	Índ. mort <sup>(c)</sup>	nº muertes	Años vida perdidos x muertes	CRF (anual YOLL por [persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup> ])	CRF nº muertes/ persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
30–34	238.826	7,0%	47,6	0,0011	263	12.504,93	1,88E-04	3,96E-06
35–39	216.332	6,4%	42,8	0,0013	281	12.036,71	2,00E-04	4,68E-06
40–44	201.813	5,9%	38,1	0,0021	420	15.993,28	2,85E-04	7,49E-06
45–49	207.867	6,1%	33,5	0,0033	692	23.188,60	4,02E-04	1,20E-05
50–54	187.270	5,5%	29,0	0,0057	1.067	30.955,73	5,95E-04	2,05E-05
55–59	170.542	5,0%	24,7	0,0096	1.630	40.270,42	8,50E-04	3,44E-05
60–64	142.396	4,2%	20,8	0,0134	1.904	39.599,76	1,00E-03	4,81E-05
65–69	130.655	3,9%	17,1	0,0215	2.813	48.102,34	1,33E-03	7,75E-05
70–74	108.578	3,2%	13,8	0,0307	3.328	45.925,24	1,52E-03	1,10E-04
75–79	98.029	2,9%	10,6	0,0522	5.116	54.231,02	1,99E-03	1,88E-04
80–84	64.336	1,9%	8,1	0,0821	5.285	42.804,93	2,40E-03	2,96E-04
85–89	35.231	1,0%	6,0	0,1285	4.528	27.165,21	2,78E-03	4,63E-04
90–94	12.732	0,4%	4,2	0,1997	2.542	10.677,77	3,02E-03	7,19E-04
95–	4.098	0,1%	3,0	0,3083	1.263	3.789,87	3,33E-03	1,11E-03
<b>Total</b>	<b>3.392.897</b>	<b>-</b>			<b>24.202</b>	<b>501.359</b>	<b>8,06E-04</b> (promedio >30 años)	<b>6,16E-05</b> (promedio >30 años)

(a) Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Población total proyectada según grupos de edades (2009). <http://www.ine.gub.uy> (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(b) Instituto Nacional de Estadística. Tabla abreviada de mortalidad de ambos sexos según grupo de edad (2004). <http://www.ine.gub.uy> (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(c) **Índ. Mort**= Índice de mortalidad. Es la cantidad de muertes por grupo de edad por año, dividido por la población perteneciente a ese grupo de edad. Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Tabla abreviada de mortalidad de ambos sexos según grupo de edad (2004). <http://www.ine.gub.uy> . (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(d) YOLL/Receptor durante tiempo de vida (TV) cuando es expuesto a una concentración C.

### Anexo 8: CRF para mortalidad crónica (Paraguay)

Grupo de edad	Población <sup>(a)</sup>	f <sub>pop</sub>	LE <sup>(b)</sup> (años)	Índ. mort <sup>(c)</sup>	nº muertes <sup>(d)</sup>	Años vida perdidos x muertes	CRF (anual YOLL por [persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup> ])	CRF nº muertes/ persona. µgPM <sub>10</sub> /m <sup>3</sup>
30–34	430.039	6,78%	47,4	0,00165	710	33.633,35	2,82E-04	5,94E-06
35–39	357.765	5,64%	42,8	0,00205	733	31.390,30	3,16E-04	7,38E-06
40–44	330.724	5,22%	38,2	0,00297	982	37.521,96	4,08E-04	1,07E-05
45–49	292.963	4,62%	33,7	0,00414	1.213	40.873,61	5,02E-04	1,49E-05
50–54	252.447	3,98%	29,4	0,00617	1.558	45.793,38	6,53E-04	2,22E-05
55–59	208.366	3,29%	25,2	0,00833	1.736	43.739,36	7,56E-04	3,00E-05
60–64	154.465	2,44%	21,2	0,01433	2.213	46.925,85	1,09E-03	5,16E-05
65–69	115.328	1,82%	17,6	0,01969	2.271	39.966,23	1,25E-03	7,09E-05
70–74	85.801	1,35%	14,1	0,02924	2.509	35.374,38	1,48E-03	1,05E-04
75–79	57.285	0,90%	10,9	0,05073	2.906	31.676,14	1,99E-03	1,83E-04
80–84	30.817	0,49%	8,4	0,07763	2.392	20.095,63	2,35E-03	2,79E-04
85–89	17.269	0,27%	6,2	0,1201	2.074	12.859,20	2,68E-03	4,32E-04
90–94	6.687	0,11%	4,4	0,18679	1.249	5.495,91	2,96E-03	6,72E-04
95–99	1.890	0,03%	3,1	0,29137	551	1.706,99	3,25E-03	1,05E-03
100–	392	0,01%	2,2	0,45453	178	392,47	3,60E-03	1,64E-03
<b>Total</b>	<b>6.340.641</b>				<b>29.187</b>	<b>826.348,09</b>	<b>6,57E-04</b> (promedio >30 años)	<b>3,58E-05</b> (promedio >30 años)

(a) Fuente: Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. "Anuario Estadístico del Paraguay", 2009, capítulo "Población y Viviendas", cuadro 2.1.2. Publicación disponible en <http://www.dgeec.gov.py/>

(b) LE: Expectativa de vida. Fuente: WHO (World Health Organization. Life tables for WHO Member States. Paraguay), 2009. Disponible en: [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (Consulta realizada el 29 de noviembre de 2011).

(c) Índ. Mort= Índice de mortalidad. Es la cantidad de muertes por grupo de edad por año, dividido por la población perteneciente a ese grupo de edad. Fuente: WHO Life tables for WHO Member States. Disponible en [http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality\\_life\\_tables/en/](http://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_life_tables/en/) (consulta realizada el 10 de enero de 2012).

(d) El número de muertes ha sido estimado multiplicándose la tasa de mortalidad (WHO) por la cantidad de personas pertenecientes a cada franja de edad. Se optó por esta metodología dado que, a partir de fuentes oficiales paraguayas, el dato relacionado con el número de muertes no arrojaba valores coherentes.

(e) YOLL/Receptor durante tiempo de vida (TV) cuando es expuesto a una concentración C.



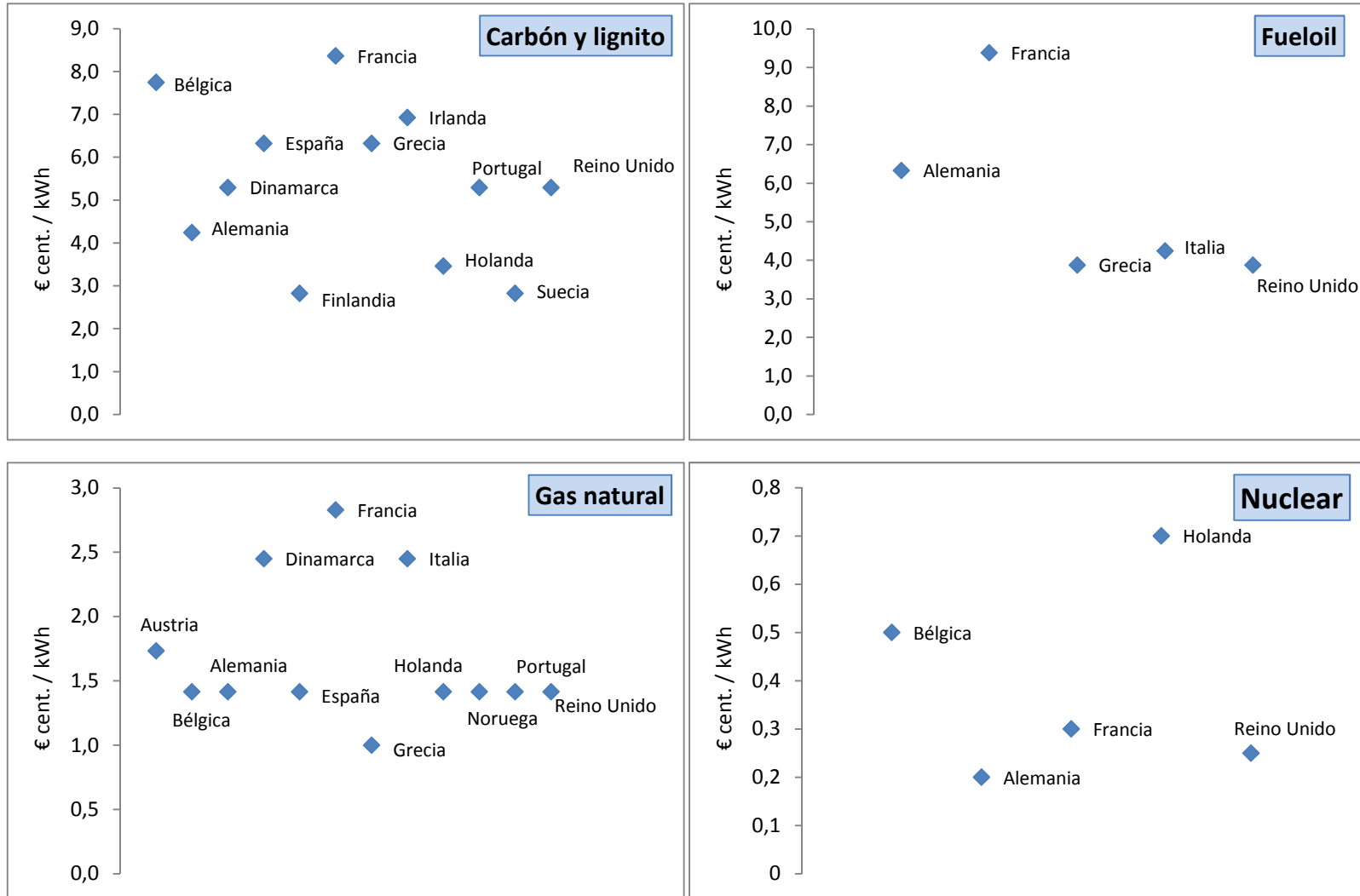
**Anexo 9: Externalidades de la energía estimadas en diversos estudios**

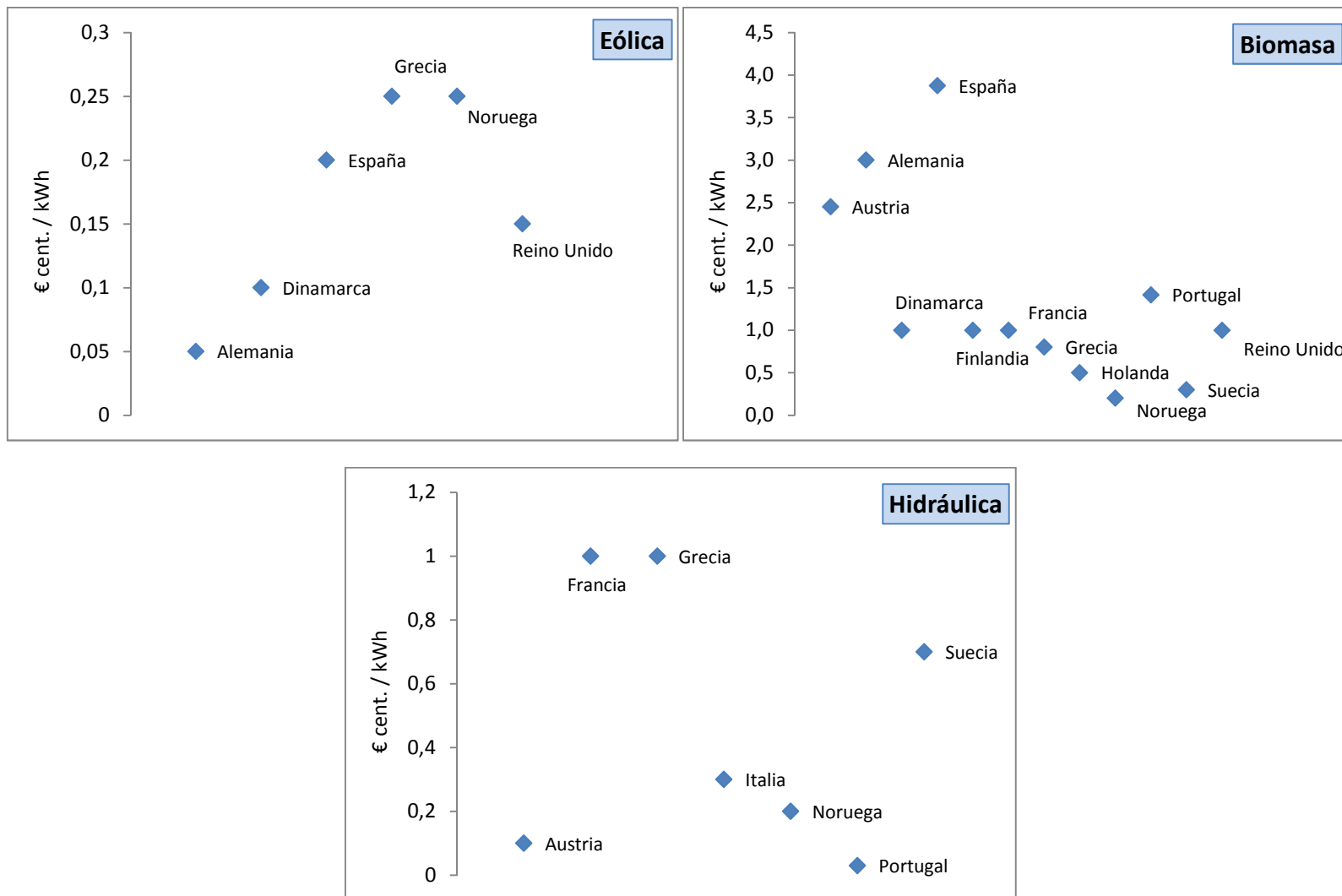
Combustible	Estudios (US\$ cent / kWh)							
	ExternE <sup>(a)</sup>	Hohmeyer (1988) <sup>(a)</sup>	Ottinger et ál. (1991)	Pearce et ál. (1992, 1995) <sup>(a)</sup>	Friedrich & Voss (1993) <sup>(b)</sup>	Ontario Hydro (1993) <sup>(a)</sup>	ORNL/RFF (1994a) <sup>(a)</sup>	Rowe et ál. (1995)
Carbón	1,4	6,0	6,7	4,1	0,6	0,5	0,1	0,3
Petróleo	1,7	6,0	4,9	9,32	-	0,04	0,02	0,15
Gas	0,104	6,0	1,4	0,64	-	-	0,01	0,02
Nuclear	0,1	14,6	3,37	0,2	0,03	0,002	0,03	0,01
Biomasa	-	-	0,8	-	-	-	0,186	0,32
Hidroeléctrica	0,329	-	-	0,0671	-	-	0,0163	-
Solar	-	-	0,465	0,117	0,18	-	-	-
Eólica	0,2	-	0,116	0,0671	0,06	-	-	0,00104

<sup>(a)</sup>Fuente: Hohmeyer et ál. (1997). Media geométrica de los valores encontrados.

<sup>(b)</sup>Fuente: Spadaro (1999). Media geométrica de los valores encontrados.

## Anexo 10: Resultados ExternE





Fuente: Elaboración propia a partir de datos del proyecto ExternE (European Commission, 1999)

**Anexo 11: Estimación del coste externo según distintas elasticidades renta de la DAP**

Afección	Nº de casos						$\gamma = 1,25$		$\gamma = 1,00$		$\gamma = 0,35$	
	Unidad	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	Nitratos	Sulfatos	Total	UC (US\$ 2009)	Coste total (miles US\$ 2009)	UC (US\$ 2009)	Coste total (miles US\$ 2009)	UC (US\$ 2009)	Coste total (miles US\$ 2009)
<b>Mortalidad</b>												
Mortalidad crónica (CM)	YOLLS/año	109	-	159	602	870	15.764	13.707	21.152	18.392	46.061	40.050
Mortalidad infantil (IF)	muerres/año	0,001	-	0,001	0,005	0,007	472.917	3	634.565	4	1.381.822	9
Mortalidad aguda (AM)	muerres/año	-	3	-	-	3	15.764	52	21.152	69	46.061	151
<b>Morbilidad</b>												
Bronquitis crónica (CB)	nuevos casos/año	4	-	6	24	34	63.056	2.215	84.609	2.971	184.243	6.471
Días de la trabajo perdidos (WDL)	días/año	4.308	-	6.273	23.720	34.301	74	2.541	99	3.410	216	7.425
Días de actividad restringida menor (mRAD)	días/año	6.187	-	9.056	34.250	49.493	12	594	16	797	35	1.735
Días de actividad restringida neta (netRAD)	días/año	5.060	-	7.386	27.930	40.376	40	1.619	54	2.173	117	4.731
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias (RHA)	ingresos/año	2	-	3	11	16	627	10	841	14	1.831	30
Ingresos hospitalarios por causas cardíacas (CHA)	ingresos/año	1	-	2	7	10	627	6	841	8	1.831	18
Síntomas del tracto respiratorio inferior adultos (LRSa)	casos/año	10.810	-	15.810	59.790	86.410	11	961	15	1.290	32	2.808
Uso de broncodilatadores adultos (BDUa)	casos/año	613	-	893	3.377	4.883	0,3	1	0,4	2	0,9	4
Síntomas del tracto respiratorio inferior niños (LRSc)	casos/año	564	-	822	3.109	4.495	11	50	15	67	32	146
Uso de broncodilatadores niños (BDUc)	casos/año	451	-	660	2.497	3.608	0,3	1	0,4	1	0,9	3
Ingresos hospitalarios por causas respiratorias - SO <sub>2</sub>	ingresos/año	-	5	-	-	5	627	3	841	4	1.831	9
Fuente: Elaboración propia							<b>Total</b>	<b>21.763</b>	<b>Total</b>	<b>29.202</b>	<b>Total</b>	<b>63.590</b>

